Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahua-El Oro, México, y sus implicaciones de impacto ambiental

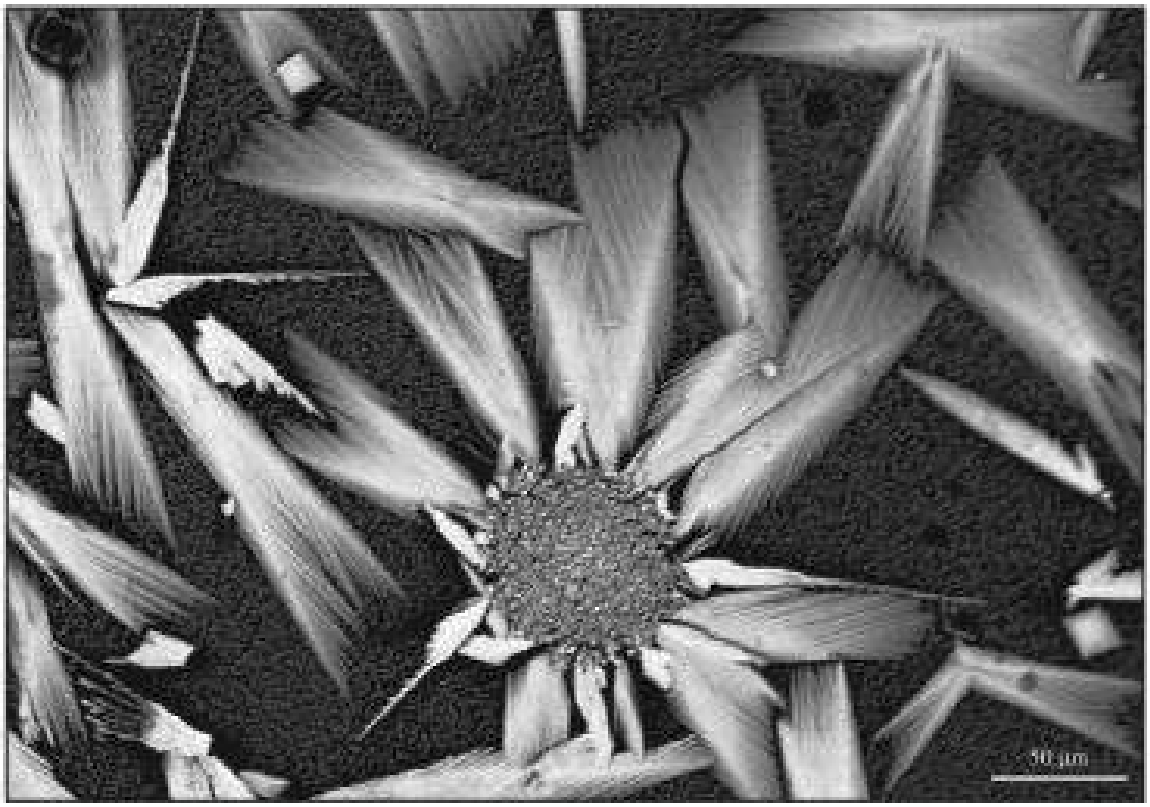
Pedro Corona-Chávez *et al.*

GUERRERO
ACADEMIA

REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

Volumen 34, número 3, diciembre 2017

http://www.rmcg.unam.mx



ISSN 1026-8774

Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahua-El Oro, México, y sus implicaciones de impacto ambiental

Pedro Corona-Chávez[1,*], Roberto Maldonado[2], Yann René Ramos-Arroyo[3], Jasinto Robles-Camacho[4], Rufino Lozano-SantaCruz[2] y Mónica Martínez-Medina[5]

[1] *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Ciencias de la Tierra, Edificio U, Ciudad Universitaria, Morelia, 58020, México.*
[2] *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Circuito interior Ciudad Universitaria, 04510, México.*
[3] *Universidad de Guanajuato, Departamento de Hidráulica y Geomática, Av. Juárez 77, Centro, Guanajuato, 36000, México.*
[4] *Instituto Nacional de Antropologia e Historia, Centro INAH Michoacán, Francisco I. Madero Oriente 799. Col. Centro, Morelia, 58000, México.*
[5] *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posgrado en Geociencias y Planificación del Territorio, Edificio U, Ciudad Universitaria, Morelia, 58020, México.*
** pcorona@umich.mx*

RESUMEN

Los depósitos de jales del distrito minero de Tlalpujahua y El Oro (DIMITO) fueron apilados sobre laderas y cañadas con un sistema de drenaje activo y cubriendo un basamento constituido por calizas carbonosas y lutitas ± andesitas que constituyen la roca encajonante de las vetas auríferas de tipo epitermal. Su morfología actual muestra profundos canales y cárcavas de erosión y se ha estimado una pérdida de material >27–34 % de su volumen original. Se presentan los resultados de un estudio cartográfico de cinco depósitos de jales que fueron abandonados hace ~68 años, así como la caracterización mineralógica y geoquímica de 12 perfiles y 48 muestras representativas. Los jales están constituidos, en general, por una matriz limo-arenosa calcárea que contiene abundantes clastos líticos. Su pH es ligeramente alcalino de 7.5 a 8.5 y muestran una baja conductividad eléctrica <80 µS/cm. Están conformados por fragmentos de cuarzo (≥ 53–68 %), seguido de líticos (7–20 %), calcita (≥12 %), silicatos (9–11 %), FeTi-óxidos (≥2–3 %) y sulfuros y sulfosales (≤2 %). Su composición química varía de SiO_2 (56–92 %), Al_2O_3 (>5–13 %), CaO+MgO (≥5–11 %), Fe_{tot} (≤3–5 %), S total (0.3–0.91 %) y C total (3.4–6.1 %). Los jales presentan concentraciones promedio de elementos potencialmente económicos: Au (1.2–1.61 g/ton), Ag (28.1–46.8 g/ton), Pb (53.3–145.2 g/ton) y Zn (155.9–354.5 g/ton), que podrían tener un cierto rendimiento económico. En relación con las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos, los valores del Sb (43.9–72.2 g/ton) superan ampliamente el LMP de alto riesgo (WHO, 2015) y una docena de muestras de Pb y Zn y de As (25.2–40.5 g/ton) muestran valores más altos a los del LMP de bajo riesgo. Sin embargo, éstos valores se observan dispersos y aleatorios en cada perfil, por lo que se discute su potencial tóxico con base en su correlación geoquímico-mineralógica y su potencial movilidad. Con el objetivo de estimar el balance ácido-base en los jales del DIMITO, se realizó un modelo matemático de normalización (reducción de Gauss) de los elementos mayores y su relación con los minerales normativos y su potencial tóxico. Se encontró que la mineralogía representa un potente indicador en el análisis de residuos mineros y su potencial tóxico, así como en general que los jales mostraron un *bajo riesgo* en la generación de drenaje ácido de mina. Sin embargo, se discuten el uso y manejo de la cobertura natural y su relación con los residuos y obras mineras del DIMITO.

Palabras clave: geoquímica; mineralogía; jales; drenaje ácido; distrito minero Tlalpujahua y El Oro; México.

ABSTRACT

The tailing dumps of the mining district of Tlalpujahua and El Oro (DIMITO) were stacked on the active drainage system and covering a basement consisting of carbonaceous limestones and shales ± andesites, which constitute the host rock of the epithermal Au vein-type deposit. This geomorphological setting shows deep channels and gullies of erosion and it has been estimated a loss of material > 27–34 % of its original volume. We present mapping of five tailing dumps that were placed ~68 year ago as well as the mineralogical and geochemical characterization of 12 profiles and 48 samples. Tailings are essentially siliceous-calcareous slime with clasts. Their pH is slightly alkaline from 7.5 to 8.5 and they show low conductivity <80 µS/cm. They are constituted by abundant quartz (≥ 53–68 %), lithics (7-20 %), calcite (≥12 %), silicates (9–11 %), Fe-Ti oxides (≥2–3 %) and sulphides and sulphosalts (≤2 %). Bulk compositions are characterized by SiO_2 (56–92 %), Al_2O_3 (>15–13 %), CaO+MgO (≥5–11 %), Fe_{tot} (≤3–5 %), S (0.3–0.91 %), and C (3.4 –6.1 %). DIMITO tailings show values of Au (1.2–1.61 g/ton), Ag (28.1–46.8 g/ton), Pb (53.3–145.2 g/ton) and Zn (155.9–354.5 g/ton), suggesting that they could still have some economic recovering. In relation to the concentrations of the potentially toxic elements, the values of Sb (27.3–72.2 g/ton) significantly exceed high risk of the LMP (WHO, 2015), and a dozen samples of Pb and Zn and As (25.2–40.5 g/ton) show higher values than low-risk of the LMP. However, these values are scattered and random in each profile, so its toxic potential is discussed based on its mineralogical-geochemical correlation and its potential mobility. In order to estimate the acid-base accounting (ABA) of the DIMITO, we carried out a mathematical model based from the Gauss-reduction normalization of the geochemical data and their relationships with normative mineralogy. We

Corona-Chávez, P., Maldonado, R., Ramos-Arroyo, Y.R., Robles-Camacho, J., Lozano-SantaCruz, R., Martínez-Medina, M., 2017, Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahua-El Oro, México, y sus implicaciones de impacto ambiental: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 34, núm. 3, p. 250-273.

 DOI: http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.3.540

found that the mineralogy represents a powerful proxy for the diagnostic of the toxic potential of the waste mines and that in general the tailings show not risk of acide mine drainage generation. However, we discuss the environment impact of the tailing dumps and the relationships with the actual land use of the DIMITO.

Key words: geochemistry; mineralogy; mine tailings; acid mine drainage; Tlalpujahua-El Oro Mining District; Mexico.

INTRODUCCIÓN

Décadas de estudios geoquímicos realizados en diversos depósitos de residuos mineros o jales en todo el mundo (Jambor, 1994; Blowes *et al*., 2003; Lottermoser, 2010; Lindsay *et al*., 2015), señalan que uno de los principales retos para evaluar el riesgo de la dispersión de elementos potencialmente tóxicos (EPT), se refiere a que los jales comúnmente muestran una amplia y aleatoria variabilidad en su composición geoquímica y mineralógica, por lo que en muchos casos es única para cada distrito minero. La composición de un jal generalmente corresponde con la combinación de todas las variables intrínsecas de su contexto geológico, así como con los diversos procesos metalúrgicos utilizados. A pesar de la aleatoriedad geoquímica de los jales, también existe un relativo consenso que revela un recurrente aumento del potencial de toxicidad, en relación con un alto contenido de sulfuros (≥2–4 %vol; *sulfidic mine wastes;* Jambor, 1994; Jamieson, 2011). Las reacciones complejas e incongruentes de intemperismo y oxidación de un jal ocasionan una notable inestabilidad química de los sulfuros y en particular de la pirita (FeS_2), potenciando la formación de un sistema químico productor de acidez (*i.e.* generación de H^+), el cual puede estar asociado con iones de sulfato (SO_4^{-2}) y hierro (Fe^{+2}/Fe^{+3}) en un sistema de soluciones ácidas, conocidas como Drenaje Ácido de Mina (DAM; Blowes y Jambor, 1994; Moncur *et al*., 2005; Blowes *et al*., 2014), que a su vez favorece la movilidad en solución de los EPT en un sistema hidrológico (Plumlee, 1999). En contraparte, durante el mismo proceso de intemperismo de un jal se llevan a cabo otro tipo de reacciones que pueden generar una relativa neutralización, ya sea por el consumo de iones H^+ o incluso, si su proporción es dominante, pueden generar un sistema no-ácido o alcalino (Jambor y Blowes, 1998; Hageman *et al*., 2015). En todo caso, el balance de las reacciones de acidez y neutralización de intemperismo en los jales, son atribuidas a la desestabilización de los minerales primarios, ya sea como formadores de roca (silicatos, carbonatos) o inherentes al depósito mineral (ganga o mena), los cuales dan lugar a la formación de minerales secundarios, que pueden precipitar, inhibir y/o neutralizar el sistema durante los procesos de intemperismo (Jambor 2003; Paktunc, 1999; Jamieson *et al*., 2015). En consecuencia, la comprensión del potencial tóxico de un depósito de residuos mineros se logra con base en una descripción detallada de los minerales y su correlación con la composición geoquímica. Por otro lado, una creciente base de datos geoquímico-mineralógicos y de su potencial tóxico, ha dado lugar a ensayos estadísticos y de modelado numérico (Paktunc 2003; Jambor *et al*., 2004; Bouzahzah *et al*., 2014). De este modo, se han logrado establecer algunas hipótesis de *predicción* en términos de Price (2009), que considera el balance de las reacciones ácido-base de un residuo minero (Acid-Base Accounting; ABA), como una herramienta útil para proponer algunas estrategias de manejo de los residuos mineros (Lottermoser, 2017).

El distrito minero de Tlalpujahua y El Oro (DIMITO) se ha caracterizado por una riqueza histórica de oro y plata relacionada a un sistema de vetas epitermales (Flores, 1920; Camprubí *et al*., 2003; Bustamante-García 2007). Sus recursos mineros han sido extraídos por más de cinco siglos y durante diversos periodos de extracción se han generado millones de toneladas de residuos mineros sulfúreos (Uribe-Salas, 2008; Corona-Chávez *et al*., 2010). Con base en estudios previos de cartografía (Corona-Chávez y Uribe-Salas, 2009; Martínez-Medina, 2009), se observa que los depósitos de jales fueron acumulados sobre cañadas con un sistema de drenaje activo. Actualmente su morfología muestra profundos canales y cárcavas de erosión, revelando una evidente remoción fluvial del material. Por medio de un cálculo de la densidad de drenaje, asistido por un SIG, en comparación con datos históricos de producción de jales (Uribe-Salas 2008), se ha estimado una pérdida entre el 27 % y 34 % de su volumen original (Corona-Chávez *et al*., 2010). Posteriormente, otros estudios han documentado el deslave histórico de "Las Lamas" ocurrido en 1937 (Bernal-Navarro, 2012; Macías-Vázquez *et al*., 2015; Sánchez-Núñez *et al*., 2015). Desde el punto de vista geoquímico, Corona-Chávez *et al*. (2010) presentan una descripción de campo y algunos resultados geoquímicos preliminares de elementos mayores. Recientemente, Morales *et al*. (2016) discuten la correlación de algunos elementos químicos con las propiedades magnéticas de los jales. Sin embargo, hasta el momento no se cuenta con una descripción detallada de la mineralogía y geoquímica de elementos en traza de los jales del DIMITO.

En este artículo se presenta la caracterización física de campo, la descripción de la composición mineralógica, así como la correlación geoquímica de elementos mayores y en traza de 48 muestras colectadas en 12 perfiles, así como de muestras aisladas representativas de jales y terreros del DIMITO. Se discute la influencia de la erosión y el clima en los procesos de oxidación e intemperismo, así como la relativa estabilidad de los jales del DIMITO. Finalmente, se implementa un modelo matemático algébrico para el cálculo del ABA (Paktunc, 1998; Paktunc *et al*., 2004), como una herramienta útil para discutir el potencial riesgo y la movilidad de los EPT de los jales del DIMITO.

LOCALIZACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO DEL DIMITO

El distrito minero de Tlalpujahua y El Oro (DIMITO) está localizado en los límites de los Estados de México y Michoacán, entre las coordenadas geográficas 19°52', 19°45' de latitud norte y 100°05', 100°20' de longitud oeste y comprende un área aproximada de 230 km^2 (Figura 1). Las ciudades más importantes son El Oro de Hidalgo y Tlalpujahua de Rayón, las cuales distan alrededor de 7 km una de la otra. La altitud promedio es 2,520 m s.n.m. El clima es templado sub-húmedo con lluvias en verano (García, 1998). La precipitación media anual es de 884 mm, sin embargo, los meses más lluviosos son de junio a septiembre, precipitando en forma torrencial ~67 % de la lluvia total (Martínez-Medina, 2009). El DIMITO se encuentra dentro de la subcuenca del Alto Lerma. Los ríos principales: Tlalpujahua, San Miguel y Tultenango son permanentes, mientras que el resto de los arroyos drenan únicamente durante la época de lluvias.

La distribución de las unidades geológicas del DIMITO es compleja (Figura 1). La secuencia más antigua o basamento se caracateriza por una secuencia volcánico-sedimentaria del Jurásico superior-Cretácico inferior perteneciente al terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983; Centeno-García *et al*., 2003), la cual en el área de estudio está constituida principalmente por la intercalación de una secuencia silíceo-pelítica (Tlalpujahuilla) y calcáreo-pelítica (Dos Estrellas y Remedios) asociada con algunos derrames volcánicos (El Carmen). Esta secuencia se encuentra sobreyacida por conglomerados continentales del Eoceno (De la Teja-Segura *et al*., 2000) y una serie de unidades volcánicas félsicas (Fries *et al*., 1965; Pantoja-Alor, 1994) y derrames andesítico-basálticos del Mioceno-Plioceno relacionadas al Cinturón Volcánico Transmexicano (Hernández-Bernal *et al*., 2016). La cartografía geológico-minera en el DIMITO cuenta con antecedentes desde el siglo XIX

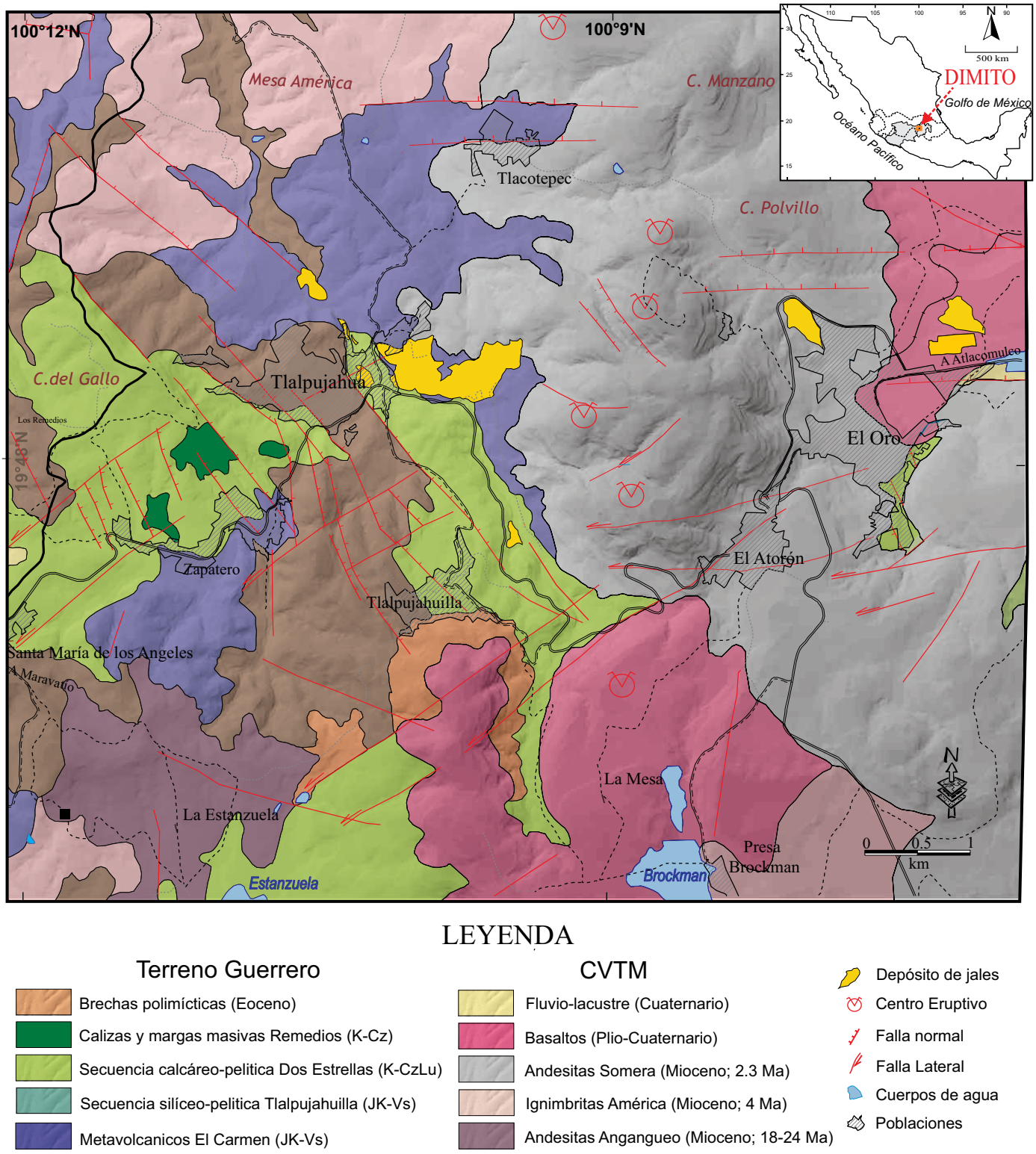


Figura 1. Mapa geológico del DIMITO (modificado de Corona-Chávez y Uribe-Salas, 2009). Abreviaciones: Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM); Jurásico (J); Cretácico (K); Plioceno (Pli); Cuaternario (Q); Caliza (Cz), Volcánico-sedimentario (Vs).

por Burkart (1869); sin embargo, la carta de base más importante fue realizada por Flores (1920), misma que fue actualizada por Silva-Ortiz y Salgato-Soto, (1988), De la Teja-Segura *et al.* (1999) y Corona-Chávez y Uribe-Salas (2009; Figura 1).

DEPÓSITOS MINERALES DEL DIMITO

Los depósitos minerales del DIMITO están constituidos por un sistema de vetas que ha sido clasificado como un depósito auro-argentífero de tipo epitermal y de baja sulfuración (Albinson *et al.*, 2001). El sistema de veta-fallas se distribuye en forma antitética con una orientación promedio de N30°W con echados >70°, mientras que la longitud puede variar entre 100 y 3,500 m (Flores, 1920; De la Teja-Segura *et al.*, 1999; Figura 2). Las vetas se encuentran alojadas en las rocas del basamento cretácico, generalmente en unidades metasedimentarias calcáreas y calcáreo-pelíticas y en menor proporción en rocas metavolcánicas. Los espesores de las estructuras de veta son muy variables desde 0.5 hasta 33 m. Las zonas de alteración típicas son de argilización (sericitización) ± oxidación ± silicificación y raramente propilitización. Los minerales económicos o mena consisten de una serie de sulfuros y sulfosales auro-argentíferos complejos asociados a una matriz de ganga constituida esencialmente de cuarzo ± calcita. De la Teja-Segura *et al.* (1999) han definido al menos tres etapas de mineralización: 1) pirita-calcopirita-arsenopirita; 2) esfalerita-galena-calcopirita; 3) boulangerita-freigbergita-pirargirita-oro-naumanita-aguilarita-fischesserita-crookesita, oro y plata nativos. Los valores promedio en sus leyes varían entre 4–5 g/ton Au y 225–300 g/ton Ag (Elvir-Aceituno, 1955). Sin embargo, fueron reportadas mineralizaciones que alcanzaron leyes históricas de hasta 0.1–3 kg/ton de oro y de 2–70 kg/ton de plata (Uribe-Salas, 2008).

OBRAS, RESIDUOS MINEROS Y JALES EN EL DIMITO

Aunque se considera que la extracción de metales en el DIMITO comenzó desde la época prehispánica, en realidad las obras mineras industriales iniciaron a fines del siglo XVI, en lo que fue conocido como el "Real de Minas de Tlalpujahua". Durante la época de la Colonia y hasta fines del siglo XVII se explotaron una serie de vetas expuestas (Coronas y Borda), localizadas en el corazón de la actual ciudad de Tlalpujahua. En 1787, en coincidencia con el descubrimiento de la veta San Rafael en El Oro, se alcanzó en toda la región un importante auge hasta 1868. Sin embargo, la etapa de mayor productividad del distrito iniciaría en los albores del siglo XX, cuando se descubrieron bajo el cerro Somera, las estructuras subterráneas de las vetas Verde, Nueva y Negra, las cuales contenían importantes concentraciones de oro y que habrían de ser intensamente explotadas hasta 1938, tiempo en que la actividad declinó en forma abrupta, para cesar por completo en 1949 (Corona-Chávez *et al.*, 2010). Para una primera aproximación visual del impacto de las obras de extracción minera en el DIMITO, en la Figura 2 se presenta la cartografía de más de 35 estructuras de vetas mineralizadas que fueron explotadas utilizando más de 61 obras mineras de extracción (socavónes, tiros). En la Figura 2, también se muestra la distribución de los residuos mineros (jales y terreros), donde los cinco depósitos de jales corresponden sólo a los volúmenes generados durante la última etapa de extracción. Esta etapa inició a partir de 1902 y por medio del método de cianuración se logró una alta recuperación metalúrgica (~99 % Au y ~56 % Ag), incrementándose de manera exponencial la generación de jales y alcanzando más de 1 Mt/año (Uribe-salas, 2008). Acerca de los jales generados por el método de amalgamación durante la época de la colonia y hasta fines del siglo XIX, aparentemente no queda algún vestigio. Los depósitos eran relativamente pequeños y sus residuos (≤2,300 ton/año), fueron directamente descargados a los ríos, en al menos 12 haciendas de beneficio (Uribe-Salas, 2008).

Los antecedentes de estudio geoquímicos de los depósitos de jales del DIMITO se remontan a 1925, cuando se realizaron algunos ensayes químicos y se reportaron leyes de oro y plata promedio de 2.75g/ton y 75 g/ton respectivamente (Aguilar-Contreras, 1971). Desde esa época han sido sometidos a diferentes pruebas de laboratorio e incluso se hicieron algunas propuestas para su recuperación por medio de una planta metalúrgica piloto; sin embargo, nunca se logró llevar a cabo una inversión a nivel industrial. Recientemente la empresa minera Gold Corp presentó un informe público (Candente, 2014), para el depósito de jales Tiro México (ver en Figura 2), en el que reporta valores económicos similares a Aguilar-Contreras (1971). Por otro lado, recientemente, Morales *et al.* (2016) realizaron un estudio de la susceptibilidad magnética (SM) de muestras de jales, en el que observan que algunos elementos como el Fe, As y Pb muestran una buena correlación lineal con sus propiedades físicas, por lo que considera la SM una potencial técnica o *proxy* para identificar su toxicidad.

ESTRATEGIA DE MUESTREO Y TÉCNICAS ANALÍTICAS

Se realizó un mapeo detallado de los cinco depósitos de presas de jales del DIMITO (Figura 2, Tabla 1). De oeste a este: i) El Carmen; ii) Cedros; iii) Dos Estrellas; iv) Tiro México; v) El Oro Conalep (La Esperanza). El muestreo de los jales se llevó a cabo en campañas interdisciplinarias de campo colectando muestras durante los años 2006-2008. Se dscribieron 12 perfiles y se colectaron muestras aisladas de jales, considerando una distribución espacial y representatividad geoquímica (Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, 2006). Las estaciones de muestreo se seleccionaron considerando la altitud y tres posiciones al interior del depósito (cima, intermedia y basal), con la finalidad de identificar variaciones durante los procesos de lixiviación. Para cada muestra se describieron y caracterizaron en campo las propiedades físicas como: color, granulometría, pH, conductividad eléctrica, temperatura, nivel de efervescencia de carbonatos (Tabla 2). Siguiendo el método de Siebe-Grabach *et al.* (1996), se colectaron 1–2 kg de cada muestra, las cuales fueron colocadas en una estufa para su secado a una temperatura <40 ºC y fueron sucesivamente homogeneizadas por el método de cuarteo, separando diversas alícuotas para: i) su análisis granulométrico por medio de un equipo *Lasser-Coulter*; ii) la determinación mineralógica; y iii) análisis geoquímicos. Se prepararon láminas delgadas para microscopía óptica de luz transmitida y luz reflejada. Para cada muestra se determinó la textura y los porcentajes modales de los minerales primarios (encajonante y mena) y secundarios (Jambor, 1994), así como de los fragmentos líticos. Sucesivamente, se seleccionaron 21 muestras

Tabla 1. Datos de las superficies y espesores mínimo y máximo de las presas de jales del DIMITO (Modificado de Corona-Chávez *et al.*, 2010 y Martínez-Medina, 2009).

Presa de Jales	**Área** (m^2)	**Área** (ha)	**Área** (%)	**Espesor** (m)	
				máximo	mínimo
Los Cedros	394,152.81	39.42	63.28	35.3	12.4
Dos Estrellas	14,866.47	1.49	2.39	1.75	0.50
Tiro México	77,682.10	7.77	12.47	23.7	6.4
CONALEP	113,898.82	11.39	18.29	2.2	1.40
El Carmen	22,164.02	2.22	3.56	1.83	0.45
Total	**622,764.22**	**62.29**	**100**	-	-

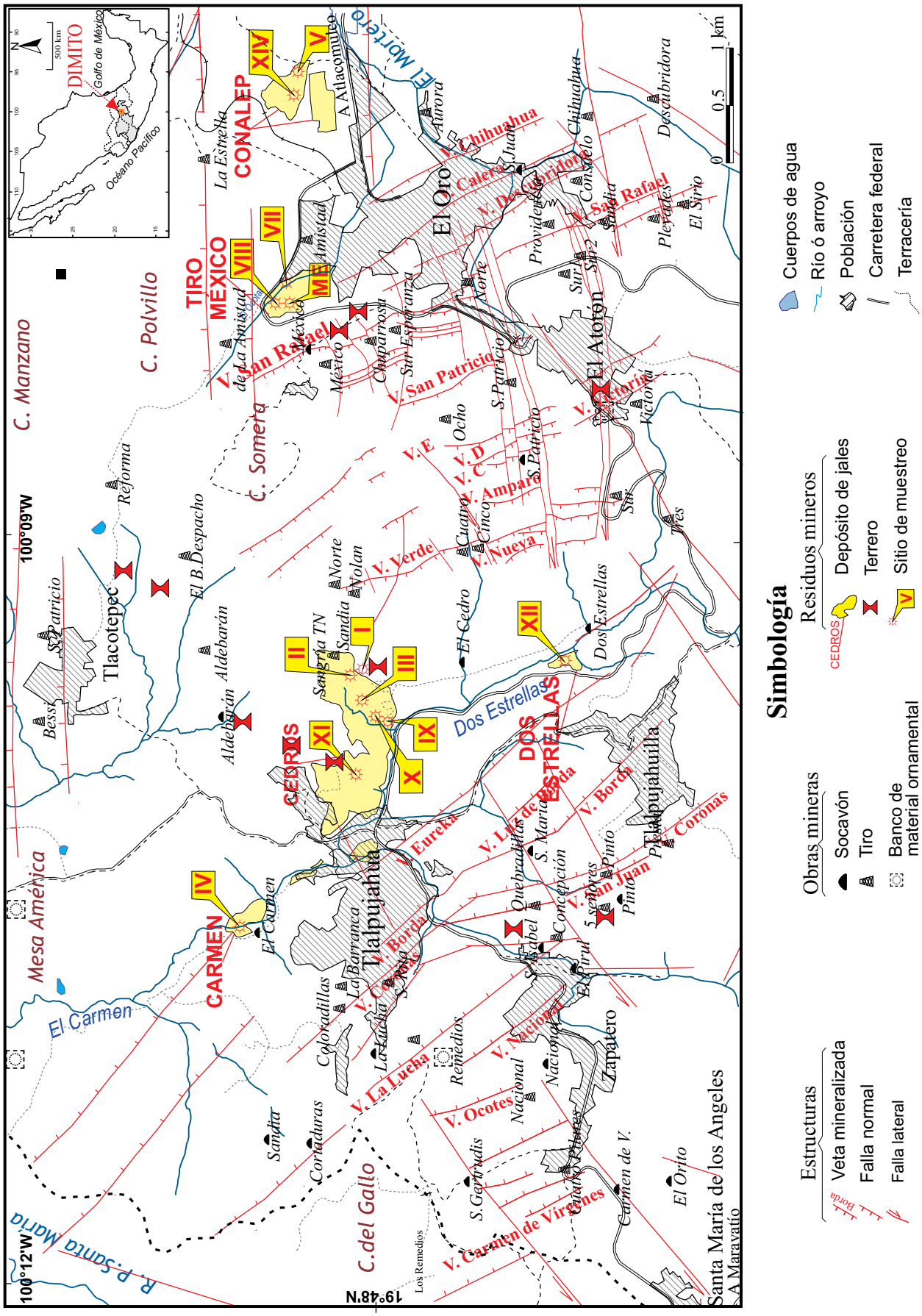


Figura 2. Mapa de vetas de mineralización, obras mineras y de los residuos mineros *jales* y *terreros* del DIMITO (Tomado de Corona-Chávez y Uribe-Salas 2009). Notar el nombre del depósito y la localización de las estaciones de muestreo de jales de este estudio.

Tabla 2. Localización (coordenadas UTM X; Y) y características físicas de espesor (en centímetros), color, pH, conductividad eléctrica (µS/cm), temperatura (°C) y porcentajes de $CaCO_3$ de los perfiles de jales del DIMITO. Las etiquetas de las muestras con asterisco corresponden con su análisis químico de elementos mayores (Tabla 4) y en traza (Tabla 5).

TLALPUJAHUA								
Muestra	**Espesor**	**material**	**Color**	**Textura**	**T °C**	**pH**	**Ce µS/cm**	**$CaCO_3$**
Perfil: Terrero cima (X=378,537; Y=2'190,425; h=2,628 m s.n.m.)								
EI-H1	0–30	jal-suelo	gris obscuro rojizo	arcillo limoso	16.9	7.15	30	_
EI-H2	30–70	jal	café obscuro rojizo	franco limoso	16.8	6.83	20	__
EI-H3	>70	jal	café	franco arcilloso	16.6	6.39	60	_
Perfil: Terrero cima2 (X=378,528; Y=2'190,449; h=2,625 m s.n.m.)								
EII-H1*	0 a 1	jal-suelo	café obscuro	franco arcilloso	16.0	8.17	60	moderada
EII-H2	1 a 23	jal	gris Obscuro	franco arcillo limosa	16.9	7.13	40	medio
EII-H3*	23–50	jal	gris Obscuro	arcilla limoso	16.0	8.32	60	moderada
Perfil: Cedros basal (X=378,361; Y=2'190,457; h=2,593 m s.n.m.)								
EIII-H1*	0–2	jal	café obscuro grisáceo	franco	27.1	8.14	100	alto
EIII-H2*	2–17	jal	café obscuro grisáceo	arcillo limoso	26.7	8.43	110	alto
EIII-H3*	17–32	jal	gris obscuro	franco	26.4	8.4	90	alto
EIII-H4*	32–80	suelo	amarillo pálido	_	28.5	5.89	2,090	medio
EIII-H5*	80–110	basal	amarillo pálido	_	29	5.14	570	medio
EIII-H6*	110–130	basal	café amarillento	_	31.9	6.87	330	medio
Perfil: El Carmen mezcla (X=377,057; Y=2'191,164; h=2,512 m s.n.m.)								
EIV-H1	0–13	jal-suelo	_	_	_	_	_	_
EIV-H2*	13–54	jal	café obscuro grisáceo	franco limoso fino	22.4	8.52	110	25-50
EIV-H3	54–183	jal	café obscuro grisáceo	franco limoso fino	23.6	8.4	110	25-50
Perfil: Cerámica basal (X=378,245; Y=2'190,369; h=2,576 m s.n.m.)								
EIX-H1*	0–15	jal	café	franco	18.4	8.45	406	alto
EIX-H2*	15–80	jal	café obscuro grisaceo	franco	18.4	8.78	166	alto
EIX-H3*	80–85	basal	café amarillento	arcillo limoso	18.5	8.09	197	muy alto
EIX-H4*	85–88	jal	gris obscuro	arcilloso medio	17.6	8.49	6,780	medio
EIX-H5*	>88	basal	café amarillento	arcillo arenoso	18.6	8.05	218	alto
Perfil: Cerámica basal2 (X=378,246; Y=2'190,364; h=2,575 m s.n.m.)								
EX-H1	0–180	jal	café ligeramente olivo	franco	18.5	8.29	1,139	alto
EX-H2*	180–260	jal	café grisaceo obscuro	arcillo limoso	19	8.06	113	alto
EX-H3	260–261	jal	_	_	_	_	_	_
EX-H4*	>261	jal	café grisaceo obscuro	migajòn arcillo limoso	18	8.04	3,420	alto
Perfil: Guerrita basal (X=377,942; Y=2'190,493; h=2,570 m s.n.m.)								
EXI-H1*	0–10	suelo	gris muy obscuro	arcillo limoso	18.7	8.32	76.2	alto
EXI-H2*	10–38	jal	café grisáceo	migajón limoso	19.6	8.66	78.4	alto
EXI-H3*	38–42	jal	gris obscuro	migajón arcillo limoso	18.4	9.03	67.5	alto
EXI-H4*	42–190	jal	café	arcilloso medio	19.5	8.87	1,728	alto
EXI-H5*	190–220	basal	café amarillento	arcilloso medio	19.7	7.4	3,960	bajo
EXI-H6*	>220	basal	gris obscuro	roca	18.8	6.71	1,530	medio
Perfil: Cedros intermedio (X=378,691; Y=2'189,202; h=2,602 m s.n.m.)								
EXII-H1*	0–3	jal/suelo	café grisáceo obscuro	arena migajosa	18.6	7.14	35	_
EXII-H2	3–37	suelo	café obscuro amarillento	migajón arcillo arenoso	18.7	8.14	43.2	_
EXII-H3*	37–120	jal	café ligeramente amarillento	arena	19	7.82	31.1	alta
EXII-H4*	>120	jal	café	arcilla arenosa	20	7.65	50.8	media
Perfil: Cedros intermedio2 (X=378,251; Y=2'190,450; h=2,610 m s.n.m.)								
EXIII-H1*	_	jal	café	arcillo arenoso	18.2	8.13	1,483	muy alta
EXIII-H2	_	jal	café	arcilloso medio	18.4	8.3	6,310	muy alta
EXIII-H3	_	jal	café ligeramente olivo	arcilloso medio	18.2	7.73	12.58	muy baja
EXIII-H4*	_	jal	gris obscuro	arcilloso medio	18.1	8.39	282	muy baja

continúa

de jal con los mayores contenidos modales de minerales opacos (óxidos, sulfuros, sulfosales, etc.), las cuales fueron sometidas a un proceso de separación de minerales por el método de concentración gravimétrica y magnética (Maldonado-Villanueva, 2008). Para los residuos de minerales metálicos y pesados, se prepararon nuevas secciones pulidas para la determinación específica de *sulfuros y óxidos* por técnicas de microscopía óptica y electrónica. La determinación de minerales secundarios y de alteración se complementó por medio de difracción de rayos X por el método de polvos utilizando un equipo Siemens XRD 5000 operando en condiciones de radiación Cu Kα (λ = 1.5406 Å), 40 kV, 30 mA, paso de 0.01° y un intervalo de registro de 2θ = 5.0–70.0°. Las láminas delgadas seleccionadas fueron pulidas a 1 µm y recubiertas con grafito para ser observadas y analizadas por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS), con un equipo JEOL JSM-6400

Tabla 2 (continuación). Localización (coordenadas UTM X, Y) y características físicas de espesor (en centímetros), color, pH, conductividad eléctrica (µS/cm), temperatura (°C) y porcentajes de $CaCO_3$ de los perfiles de jales del DIMITO. Las etiquetas de las muestras con asterisco corresponden con su análisis químico de elementos mayores (Tabla 4) y en traza (Tabla 5).

EL ORO								
Muestra	**Espesor**	**material**	**Color**	**Textura**	**T °C**	**pH**	**Ce µS/cm**	**$CaCO_3$**
Perfil: Conalep basal (X=382,527; Y=2'190,905; h=2,685 m s.n.m.)								
EV-H1*	0–9	suelo	gris obscuro	arcillo limoso	20.8	8.35	48.8	alta
EV-H2*	9–52	jal	gris obscuro	arcillo limoso	18.6	8.74	89	media
EV-H3-A*	52–94	jal	café grisaceo obscuro	Migajón arenoso	21.9	8.81	79.2	alta
EV-H3-B	52–94	jal	café grisaceo obscuro	arcillo limoso	21.4	8.68	101	alta
EV-H3-C	52–94	jal	gris obscuro	arcillo limoso	21.0	8.68	101.4	alta
EV-H4*	94–103	jal	gris obscuro	arcillo arenoso	21.3	8.45	108.88	alta
EV-H5*	103–110	jal	gris olivo obscuro	arcillo limoso	18.9	8.04	765	alta
EV-H6*	>110	suelo	gris muy obscuro	Migajon arenoso	19.3	7.52	395	baja
Perfil: TiroMéxico basal1 (X=381,140, Y=2'190,964; h=2,728 m s.n.m.)								
EVII-H1*	0–1	jal	gris verdoso	Migajón arenoso	19.6	7.93	563	alta
EVII-H2	1–2	suelo	café obscuro	franco	19.8	8.33	750	alta
EVII-H3*	2–12	jal	gris obscuro	Migajon arenoso	19.9	8.46	197	alta
EVII-H4*	12–21	jal	gris verdoso obscuro	arcilloso medio	19.6	7.97	378	sin
EVII-H5*	21–29	basal	café muy obscuro	arcillo arenoso	18.8	4.48	895	sin
EVII-H6*	29–39	basal	café obscuro	arcillo arenoso	19	6.83	342	baja
EVII-H7*	39	suelo	café obscuro	_	19.4	7.14	240	baja
TiroMéxico intermedio (X=381,140; Y=2'190,964; h=2,728 m s.n.m.)								
ME07m*		jal	gris obscuro	arcilloso medio	19.8	8.64	8,180	alta
ME07c*		jal	gris obscuro	franco	20.2	7.25	469	alta
Perfil: Tiro México basal2 (X=381,066; Y=2'191,068; h=2,732 m s.n.m.)								
EVIII-H1*	0–62	suelo	gris obscuro	franco	19.0	8.54	655	alta
EVIII-H2*	62–67	suelo	café rojizo obscuro	arcillo arenoso	19.4	7.81	1,937	muy baja
EVIII-H3*	67–71	jal	gris obscuro	arcilloso medio	28.7	8.36	642	alta
EVIII-H4*	>71	basal	café obscuro	arcillo arenoso	18.2	5.73	5,680	sin
Perfil: Conalep intermedio (X=382,390; Y=2'190,936; h=2,674 m s.n.m.)								
EXIV-H1	0–2	jal-suelo	café obscuro grisáceo	arcilloso	19.2	7.8	144.9	alta
EXIV-H2*	2–58	jal	café	arcilloso medio	18.7	7.37	821	alta
EXIV-H3	58–80	jal	gris obscuro	arcilloso medio	18.9	7.35	1,188	muy alta
EXIV-H4	80–100	jal	café obscuro grisáceo	arcilloso medio	19	7.53	1,570	alta
EXIV-H5	100–145	jal	café obscuro grisáceo	arcillo limoso	18.8	8.24	715	alta
EXIV-H6	145–170	jal	gris obscuro	arcillo limoso	18.08	8.04	1,025	alta
EXIV-H7	170–210	jal	café obscuro grisáceo	arcillo limoso	18.5	7.86	814	alta
EXIV-H8*	210–220	jal	gris obscuro	arcillo limoso	18.1	7.95	823	alta

con analizador EDS de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Para la obtención de su composición química, los elementos mayores fueron determinados por el método de fluorescencia de rayos-X (FRX) en el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El instrumento utilizado fue un espectrómetro secuencial (LFRX -SIEMENS SRS 3000 con tubo de Rh y ventana de Berilio de 125 µm). Los elementos mayores se determinaron en muestra fundida (Lozano-SantaCruz *et al*, 1995), mientras que un total de 43 elementos en traza fueron medidos por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), utilizando un equipo Agilent 7500 ce del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Se seleccionaron 12 muestras representativas de cada perfil y por medio de un analizador tipo Leco Modelo C-S-224, se determinaron las concentraciones de azufre y carbono (S/C). La reproducibilidad de los datos se obtuvo por el promedio de las concentraciones y la desviación estándar de múltiples digestiones del material de referencia del US Geological Survey Geochemical Reference Material BHVO-1. Además del muestreo de los perfiles, se colectaron dos muestras aisladas de terreros (vetas Coronas y Borda), para realizar un ensaye de Au y Ag por fusión y apartado con determinación gravimétrica; dicho estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Química del Departamento de Minas y Metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Finalmente, se calculó el potencial de neutralización (PN) y acidez (PA), así como su balance ácido-base (ABA), utilizando los programas *Modan* y *mNP* y el método de Paktunc (1998; 1999; 2003) e, incorporando las correcciones para los Al-silicatos aplicadas por Jambor *et al*. (2004). El cálculo se basa en la composición geoquímica de elementos mayores, incluyendo los valores de azufre y carbono (Paktunc, 1999; Bouzahzah *et al*., 2014). Se calcula la composición normativa de los minerales: silicatos, carbonatos y sulfuros, los cuales son sucesivamente ponderados, con base en un índice estadístico de capacidad de generación de acidez (Paktunc, 1999; Jambor, 2003).

RESULTADOS

Cartografía y caracterización física de los jales del DIMITO

En la Figura 2 se presenta el resultado del mapeo de los residuos mineros (jales y terreros), así como la ubicación georeferenciada de tiros y socavones, mientras que en la Figura 3 se muestran imágenes

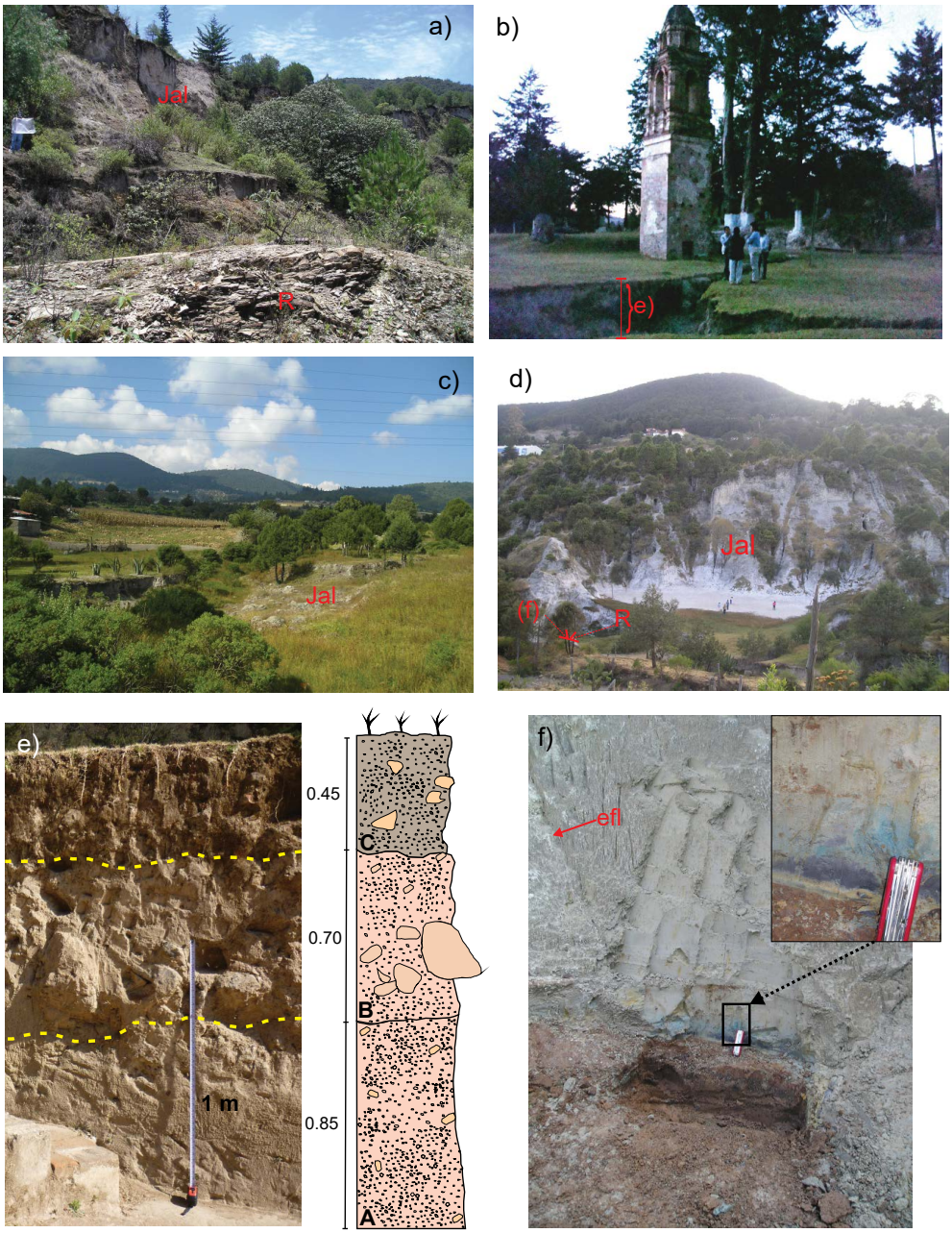


Figura 3. Fotografías de campo de los jales del DIMITO. a) Vista actual de la presa de Jales Cedros de Tlalpujahua; b) Vista de los remanentes de los jales El Carmen, producidos por el deslave del 27 de mayo de 1937 (Bernal-Navarro, 2012; Macías-Vázquez *et al*., 2015). c) Vista actual de los jales Conalep (Esperanza) en El Oro; d) Vista actual de los Jales Tiro México de El Oro. e) Perfil de la columna de los jales de El Carmen (después de Sánchez-Núñez *et al*., 2015). Notar la profundidad en cm, de los niveles A, B y C que fueron separados por sus propiedades físicas de campo. f) Perfil EVII-Tiro México. Notar las costras blanquecinas de eflorescencia y el recuadro que muestran el efecto de lixiviados de los jales. Abreviación R = Sustrato rocoso.

con el aspecto actual de los diversos depósitos de jales. El área total de los jales del DIMITO corresponde a 622,764.22 m^2 (Tabla 1). Sin embargo, su distribución en el DIMITO es muy variable: la presa de jales *Cedros* (Figura 3a), en la región de Tlalpujahua ocupa un total de 63.3 %. Los jales de *El Carmen*, con un área de 2.22 has (3.56 %), provienen de la antigua presa *Cedros*, en cuanto se relacionan al alud de fango que se desbordó en 1937 (Figura 3b; Macías-Vázquez *et al*., 2015). En la región de El Oro se exponen los jales de La Esperanza o *CONALEP*, con 18.3 % y *Tiro México* con 12.5 % en el Municipio de El Oro (Figuras 3c y 3d). El espesor y el volumen de los depósitos varía desde centímetros (*El Carmen*) hasta 35.3 m (*Cedros*), en cuanto dependen de la productividad de cada planta metalúrgica y del apilamiento sobre un "paleo-relieve" natural de la cañada del depósito (Figura 4). Es importante hacer notar que, en correspondencia con un incremento de volumen, los depósitos de jales han dado lugar a geoformas de cárcavas y canales de erosión (Figura 3d), sugiriendo una evidente pérdida de volumen por una singular e intensa erosión fluvial.

En todos los depósitos de jales es posible observar una cobertura heterogénea de vegetación arbustiva y de bosques de cedros, encinos y pinos. El color de los jales varía generalmente de gris a café, pero

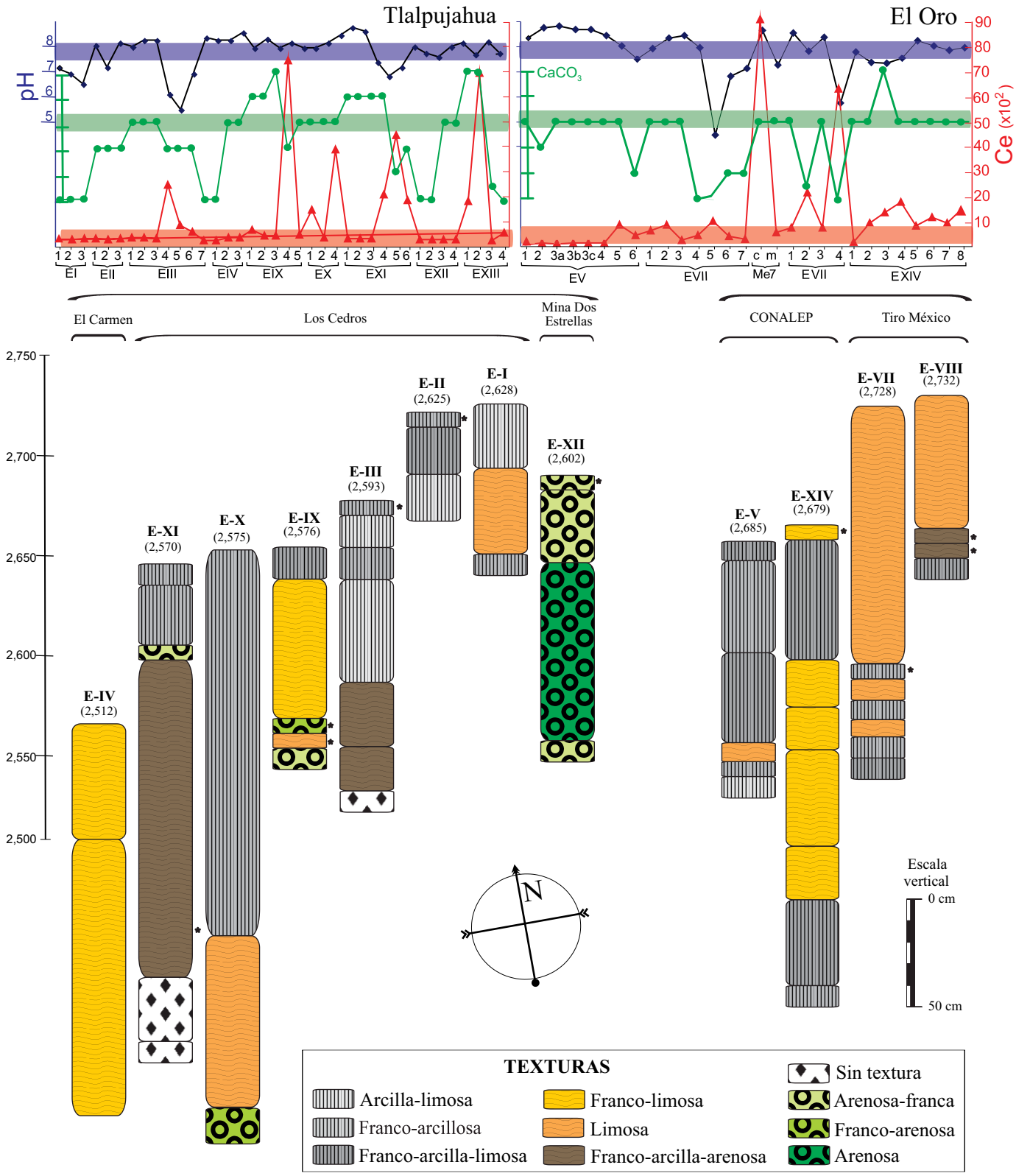


Figura 4. Perfiles estratigráficos medidos y descritos en el DIMITO. Notar la orientación general, la altitud en metros sobre el nivel del mar y la caracterización granulométrica de campo (Siebe-Grabach *et al.* (1996). Arriba las gráficas de sus propiedades físicas de pH (azul), Ce, conductividad eléctrica (rojo; µS/cm) y $CaCO_3$ ó nivel de carbonatación (verde).

se presentan horizontes delgados amarillo, ocre, naranja y raramente blanco (Figura 3e, Tabla 2). Los jales muestran un aspecto húmedo todo el año, así como es común observar costras blanquecinas de calcita (± sales, *e.g.* haluros e hidróxidos) formadas por lixiviación, eflorescencia y precipitación de minerals secundarios (Figura 3f). Los jales contienen en forma dispersa, horizontes delgados (~20 cm) de incrustaciones de carbonatos con espesores milimétricos. En su porción basal, algunas veces ocurren capas centimétricas asociadas a la precipitación de sulfatos de cobre y otras sales, producto de una lixiviación local (recuadro de Figura 3f). En general, los jales muestran un pH ligeramente alcalino con variaciones de 7.8 a 8.5 (Figura 4); sin embargo, los horizontes basales en tres perfiles (EIII, EVII y EVIII), son ligeramente ácidos (5.1–5.9), lo cual sugiere que los procesos de lixiviación podrían ser aún activos. La conductividad eléctrica es relativamente baja, predominan valores <200 µS/cm y sólo en pocas muestras alcanza valores ≥1,687 µS/cm, lo que podría sugerir una baja concentración de minerales solubles y/o una baja presencia de sulfatos. El 90 % de los horizontes son carbonatados con niveles de efervescencia de medio a alto.

Granulometría y mineralogía de los jales del DIMITO

Distribución del tamaño de partícula

La caracterización granulométrica de campo (Tabla 2), indica que la mayoría de los jales del DIMITO presentan texturas al tacto que varían de franco-limosas a franco-arcillosas y en menor proporción algunos horizontes muestran texturas arenosas. Por medio de la medición directa del tamaño de grano con un equipo *Lasser-Coulter* (Figura 5; Tabla 3), se puede observar que el 80 % de los jales tienden a ser limosos (4–64 µm) con variaciones importantes de arcilla <10 % y con >7–13 % de arenas finas (64–250 µm). Es importante hacer notar que en el Distrito de El Oro el tamaño de grano es muy homogéneo (limoso), mientras que en el Tlalpujahua se presenta una mayor heterogeneidad relacionada con variaciones del proceso metalúrgico de molienda.

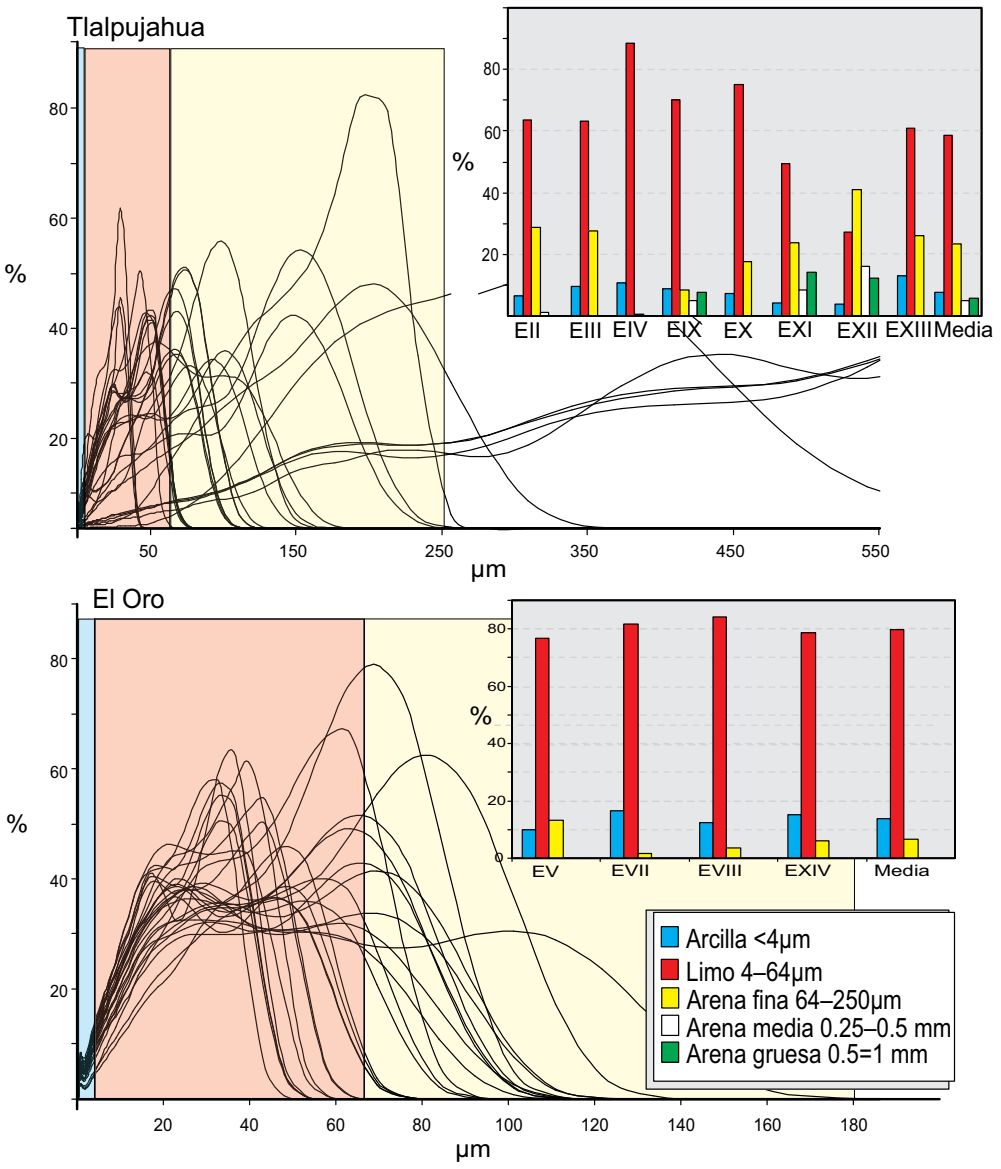


Figura 5. Resultados granulométricos de 71 de los jales del DIMITO, provenientes de los perfiles (Figura 4, Tabla 2) y muestras aisladas, realizados por medio de un detector de laser (*Lasser-Coulter*). Cada curva corresponde al porcentaje de grano (% grano) de una muestra. Los campos granulométricos han sido divididos por diámetro: arcilla (<4 µm), limo (4–64 µm), >arena fina (64–250 µm). Los histogramas corresponden a la media de cada perfil (Figura 4, Tabla 2).

Tabla 3. Estimación modal mineralógica por microscopía de luz transmitida de los contenidos de fragmentos y minerales (ferromagnesianos) de roca encajonante, minerales de ganga (cuarzo, feldespato y calcita), opacos (óxidos y sulfuros) y secundarios (arcillas); y estimación modal mineralógica por microscopía de luz reflejada de los minerales opacos (después de Maldonado-Villanueva, 2008). Abreviaciones: líticos (L); máficos (maf); cuarzo (Qz); feldespatos (fel); calcita (cal); pirita (Py); ilmenita (Ilm); hematita (Hem); Calcopirita (Cp); Arsenopirita (Apy); Galena (Gn); Titanomagnetita (Tm); Magnetita (Mg); Freibergita (Fr); Oro rico en plata (electrum) (Au); Goethita=(Gth); Po=Pirrotita; A=aguilerita; Cv=covelita.

TLALPUJAHUA												
Muestra	Petrografía							Mineragrafía	Granulometría (µm)			
	encajonante		depósito mineral				alteración					
	L	*maf*	*Qz*	*fel*	*cal*	*opaco*	*limo-arcilla*		<4	>4–64	>64–250	>250
EI-H1	80	5	2	3	–	1	9		–	–	–	–
EI-H2	87	3	2	3	–	1	4		–	–	–	–
EI-H3	86	4	3	6	–	1	–		–	–	–	–
EII-H1*	4	1	53	8	8	1	25		2.1	26.9	67.9	3.2
EII-H2	5	1	68	8	8	2	8		7.4	74.6	18.0	–
EII-H3*	5	2	43	29	8	2	11		10.2	89.2	0.6	–
EIII-H1*	4	5	49	12	12	2	16	Py, Gth,	15.2	84.8	–	–
EIII-H2*	20	4	50	5	12	1	8	Py, Hem, Gt	7.2	45.4	47.4	–
EIII-H3*	8	7	63	4	12	2	4	Py, Gn, Hem	3.0	34.8	62.3	–
EIII-H4*	4	2	3	2	8	1	80		9.0	71.0	19.0	1.0
EIII-H5*	8	–	7	1	8	1	75	Ilm, Tm, Gn, Hem, Gth	3.0	73.0	22.0	2.0
EIII-H6*	4	–	7	4	8	1	76	Ilm, Tm, Mg, Py, Gn, Gth	12.5	87.4	–	–
EIII-H7*	–	–	–	–	–	–	–		–	–	–	–
EIV-H1	22	2	43	12	10	2	9		–	–	–	–
EIV-H2*	25	3	31	15	12	2	12	Ilm, Mg, Py, Hem	10.7	88.7	0.6	–
EIV-H3	21	2	52	3	12	2	8		0.0	0.0	0.0	–
EIX-H1*	4	2	36	9	34	4	11		10.4	89.0	0.6	–
EIX-H2*	5	2	32	7	27	4	23		8.0	77.4	14.6	–
EIX-H3*	14	4	36	11	20	3	12	Hem, Gth	11.3	88.1	0.6	–
EIX-H4*	15	2	34	10	8	4	27	Py, Cp, Mg, Hem, Gth	13.8	85.9	0.4	–
EIX-H5*	10	5	61	5	12	5	2		1.2	9.5	25.4	63.9
EX-H1	7	2	50	8	18	4	11		10.0	69.7	20.3	–
EX-H2*	12	4	57	4	12	5	6	Py, Cp, Mg, Hem, Gth	5.5	62.6	31.9	–
EX-H4*	6	3	59	5	16	4	7	Cp, Hem, Gth	6.4	93.1	0.5	–
EXI-H1*	5	4	63	3	16	3	6		4.8	76.1	19.0	–
EXI-H2*	4	2	59	5	16	4	10		8.5	77.3	14.2	–
EXI-H3*	8	1	59	8	16	5	3		2.3	62.2	35.4	–
EXI-H4*	7	1	56	7	16	4	9		7.6	64.3	28.1	–
EXI-H5*	27	1	49	3	16	2	2		0.5	5.9	20.7	72.9
EXI-H6*	87	–	3	–	8	–	2		1.1	9.6	25.4	63.9
EXII-H1*	8	–	68	3	5	3	13		12.4	87.6	–	–
EXII-H2	17	5	64	7	3	2	2		1.1	10.4	88.5	–
EXII-H3*	4	1	73	7	12	2	1		0.1	1.6	51.9	46.4
EXII-H4*	13	4	58	9	12	2	2		1.1	8.4	23.8	66.6
EXIII-H1*	–	–	–	–	–	–	–		21.0	79.0	–	–
EXIII-H2	11	2	42	12	20	4	9		8.0	43.5	48.5	–
EXIII-H3	12	3	57	10	2	4	12		11.1	61.1	27.8	–
EXIII-H4*	10	3	62	8	2	3	12		11.4	60.8	27.8	–

continúa

Petrografía y texturas

Las muestras de jales en sección delgada exhiben una textura de apariencia de "pseudo-arenisca" de grano fino e inmadura, con clastos angulosos, característicos del efecto de la molienda (Figuras 6a y 6b) y una gran cantidad de matriz limo-arcillosa (>64–150 µm) de color café, ocre a grisáceo. Sin embargo, la proporción de arcillas no es evidente, en cuanto es difícil establecer una clara diferencia con la micrita o lodo calcáreo. La proporción modal de los componentes se presenta en la Tabla 3 y en la Figura 7. Con ligeras variaciones, los porcentajes medios de los clastos de jales del DIMITO indican un predominio del cuarzo entre 53 y 68 %, seguido de líticos (7–20 %) y de calcita con un promedio de ~12 % y minerales opacos entre 1 y 3 %, con un evidente predominio de óxidos sobre los sulfuros. En cuanto a los líticos, éstos consisten de una composición andesítica y calcárea; en Tlalpujahua corresponden a >15 %, mientras que en El Oro es <7.5 % del volumen total. Los feldespatos están siempre presentes en todos depósitos de jales, con porcentajes del 7–9 %. En todas las muestras se presentan silicatos ferromagnesianos (anfíbol, piroxeno, clorita) con un porcentaje entre 2 y 3 %.

Tabla 3 (continuación). Estimación modal mineralógica por microscopía de luz transmitida de los contenidos de fragmentos y minerales (ferromagnesianos) de roca encajonante, minerales de ganga (cuarzo, feldespato y calcita), opacos (óxidos y sulfuros) y secundarios (arcillas); y estimación modal mineralógica por microscopía de luz reflejada de los minerales opacos (después de Maldonado-Villanueva, 2008). Abreviaciones: líticos (L); máficos (maf); cuarzo (Qz); feldespatos (fel); calcita (cal); pirita (Py); ilmenita (Ilm); hematita (Hem); Calcopirita (Cp); Arsenopirita (Apy); Galena (Gn); Titanomagnetita (Tm); Magnetita (Mg); Freibergita (Fr); Oro rico en plata (electrum) (Au); Goethita=(Gth); Po=Pirrotita; A=aguilerita; Cv=covelita.

EL ORO												
muestra	Petrografía							Mineragrafía	Granulometría (µm)			
	encajonante		depósito mineral				alteración					
	L	*maf*	*Qz*	*fel*	*cal*	*opaco*	*limo-arcilla*		<4	>4-64	>64-250	>250
EV-H1*	17	1	55	7	12	1	7		5.7	86.1	8.3	–
EV-H2*	3	6	54	15	8	3	11	Py, Ilm, Hem, Gth	10.3	75.3	14.4	–
EV-H3A*	3	2	32	3	12	3	45	Py, Ilm, Hem, Gth	5.8	71.4	22.8	–
EV-H3B	2	2	49	17	12	3	15		13.7	78.2	8.1	–
EV-H3C	3	1	63	5	12	2	14		13.0	82.7	4.3	–
EV-H4*	3	3	57	15	12	3	7	Py, Gn, Ilm, Gth	6.4	64.4	29.1	–
EV-H5*	5	1	48	16	12	3	15	Py, Po, Mg, Gn, Hem, Gth	14.6	79.5	6.0	–
EV-H6*	3	1	31	9	4	4	48	Po, Gn, Gth	0.0	0.0	–	–
EVII-H1*	5	1	52	12	12	3	15	Py, Hem, Gth	16.8	83.2	–	–
EVII-H2	5	–	49	13	12	7	14		13.4	86.6	–	–
EVII-H3*	4	3	48	11	12	3	19	Py, Cp, Apy, Au, Fr, A, Cv, Gth	17.6	82.4	–	–
EVII-H4*	8	4	48	13	5	4	18	Py, Cp, A, Fr, Hem, Gth	16.7	83.2	–	–
EVII-H5*	7	–	56	12	4	2	19	Ilm, Hem, Gth	17.6	82.4	–	–
EVII-H6*	6	–	60	12	4	2	16	Ilm, Gn, Hem	14.7	73.8	11.5	–
EVII-H7*	5	–	50	12	4	2	27	Ilm, Gn, Hem, Gth	19.0	80.6	0.3	–
ME07m*	6	1	60	12	12	2	7		–	–	–	–
ME07c*	7	1	60	12	12	2	6		–	–	–	–
EVIII-H1*	8	2	48	13	12	3	14		12.9	87.1	–	–
EVIII-H2*	1	–	43	6	2	3	45		13.2	86.8	–	–
EVIII-H3*	8	1	55	12	12	2	10		9.1	77.1	13.8	–
EVIII-H4*	1	–	31	3	45	5	15		14.1	85.5	0.4	–
EXIV-H1	3	1	58	6	12	3	17		16.0	84.0	–	–
EXIV-H2*	3	2	54	5	12	4	20		19.1	80.7	0.3	–
EXIV-H3	2	2	24	3	20	3	46		16.5	83.2	0.3	–
EXIV-H4	4	1	43	3	12	2	35		19.7	80.3	–	–
EXIV-H5	10	1	34	1	12	4	38		11.1	77.0	12.0	–
EXIV-H6	3	–	63	4	12	5	13		11.9	66.3	21.9	–
EXIV-H7	10	1	25	2	44	3	15		13.6	74.4	11.9	–
EXIV-H8*	9	–	59	2	12	3	15		14.1	82.6	3.3	–

Mineragrafía y texturas de los minerales opacos de los jales DIMITO

Una vez separada la fracción de ≤1–5 % de los minerales metálicos, se observa que el tamaño de los minerales opacos es muy heterogéneo, puede variar desde 0.5 mm hasta ~4 µm, sin embargo, la dimensión media está entre 30–350 µm (Figura 6c). Es notable la ocurrencia de pirita (± ilmenita), con tamaños entre 50 a 200 µm, ya sea como fragmentos dispersos o como inclusiones en minerales transparentes como el cuarzo (Figura 6d). En orden de abundancia se identificaron tres grandes grupos de minerales opacos: i) óxidos ≥1.5 %, ilmenita ($FeTiO_3$), magnetita (Fe_3O_4); hematita (Fe_2O_3), goethita [FeO(OH)], ii) sulfuros entre 0.5 y 1.5 %, pirita (FeS_2), calcopirita ($FeCuS_2$), galena (PbS), pirrotita [$Fe_{(1-x)}S_{(0-.0.17)}$], argentita (Ag_2S), arsenopirita (FeAsS), covelita (Cu_5FeS_4) y, iii) sulfusales auro-argentíferas complejas <1 %, como aguilerita-freibergita (⁎ $Ag_6Cu_4Fe_2Sb_4S_{13}$), tennantita $(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$) y excepcionalmente metales nativos como Au y Ag. Las sulfosales son de tamaño variable y pueden alcanzar las 100 µm. En general se muestran bien preservadas y con frecuencia exhiben texturas internas de exsolución o intercrecimientos de otras fases, como calcopirita-aguilerita y freibergita (Figura 6e). Por el contrario, la pirita muestra un intenso reemplazamiento por alteración asociado con el crecimiento de hidróxidos goethita-limonita y hematita (Figura 6f). La pirita y la ilmenita con diámetros <50 µm, los cuales se encuentran contenidos como inclusiones en el cuarzo se observan prácticamente inalterados (Figura 6d). La diversidad de los minerales opacos primarios se correlaciona bien con la paragénesis reportada para el depósito de vetas epitermales del DIMITO (De la Teja-Segura *et al.*, 1999), mientras que, los minerales secundarios sólo se identificaron bajo forma de bordes o intercrecimientos lamelares de hidróxidos de Fe (*e.g.* goethita, hematita; Figuras 6c y 6f). Sin embargo, algunos hidróxidos también podrían ser de tipo primario tardío en el sistema hidrotermal del DIMITO (Albinson *et al.*, 2001).

Difracción de rayos X y Microscopía electrónica de barrido

En la Figura 8 se presentan dos difractogramas representativos de los jales del DIMITO, en donde se observan algunas variedades de sílice como el cuarzo (SiO_2) y cristobalita (αSiO_2), esmectita ($Al_2O_54SiO_2xH_2O$), caolinita ($Al_2\ Si_2O_54SiO_2x(OH)_4$), albita ($NaAlSi_3O_6$), calcita ($CaCO_3$), magnetita ($Fe_3O_4$), hematita ($Fe_2O_3$), goethita (FeO(OH)). Estas fases han sido reportadas comúnmente

como fases secundarias (Jambor, 1994) y podrían estar contenidas en la matriz en dimensiones sub-microscópicas y/o en formas de alteración y subordinadas a fases primarias. Con base en el análisis de imágenes generadas por electrones retro-dispersados (BSE; Figuras 8c y 8d) y de espectroscopía semicuantitativa de dispersión de energía (EDS, Figura 9), se llevó a cabo la identificación detallada de la composición y estado de oxidación de las fases minerales. Cuando la pirita supera una dimensión >80 µm, se observa que su estructura interna ha sido ampliamente descompuesta, mostrando una textura esqueletal asociada con el desarrollo de ferrhidrita en forma de lamelas que pueden variar desde 1–10 µm (Figuras 6f y 8c). En contraste, los minerales metálicos de ilmenita y pirita de dimensiones hasta de 100 µm, se observan encapsulados en cristales de cuarzo, en los cuales no muestran algún tipo de alteración (Figuras 6d y 8d). Las sulfosales con dimensiones >200 µm muestran una zonación compleja (Figura 6e). Se determinó un borde de hierro muy delgado 2–3 µm, seguido por una zona de calcopirita y en el nucleo sulfosales auro-argentíferas aguilerita-freibergita (Figura 9).

Geoquímica de los jales del DIMITO

En la Tabla 4 se presentan las concentraciones de elementos mayores de 48 muestras de los jales del DIMITO. En orden de abundancia, se puede observar que el silicio es el elemento dominante, con un rango de valores entre 56 y 92 % (en peso), seguido por el aluminio que varía de 5 a 13 %, el hierro de 3 a 5 %, el calcio de 2.5 a 5 % y el potasio de 1 a 2 %. En general, las concentraciones de los elementos mayores muestran una estrecha correlación con la mineralogía modal y en particular con los porcentajes del cuarzo, las arcillas y los líticos (Tabla 3, Figura 7). En la Figura 10, se presentan una serie de diagramas binarios que muestran la variación de las concentraciones del Al_2O_3, CaO y Fe_{Total} en relación con las concentraciones del SiO_2 y los valores del pH. Los datos fueron agrupados por estación de muestreo y a su vez fueron separados en subgrupos, en relación con su posición estratigráfica: basal, intermedia o cima. Para su correlación, también se han graficado algunos datos promedio de otros distritos mineros del país: Guanajuato (Ramos-Arroyo *et al*., 2004), Taxco (Talavera *et al*., 2005; Armienta *et al*. 2003), Zimapán (Armienta y Segovia, 2008) y Santa Bárbara (Martín-Romero *et al*., 2008). En principio es interesante notar que, cuando los valores de SiO_2 son >65 %, se observa una relativa tendencia lineal con el aluminio, el hierro y el calcio. Esta tendencia sugiere una estrecha relación entre estos elementos con el incremento del cuarzo y feldespatos, por lo tanto, con los procesos hipogénicos (*e.g.* magmático/hidrotermal) del depósito mineral. Sin embargo, cuando los valores de SiO_2 son <65 %, el CaO y Fe_{Total} muestran una

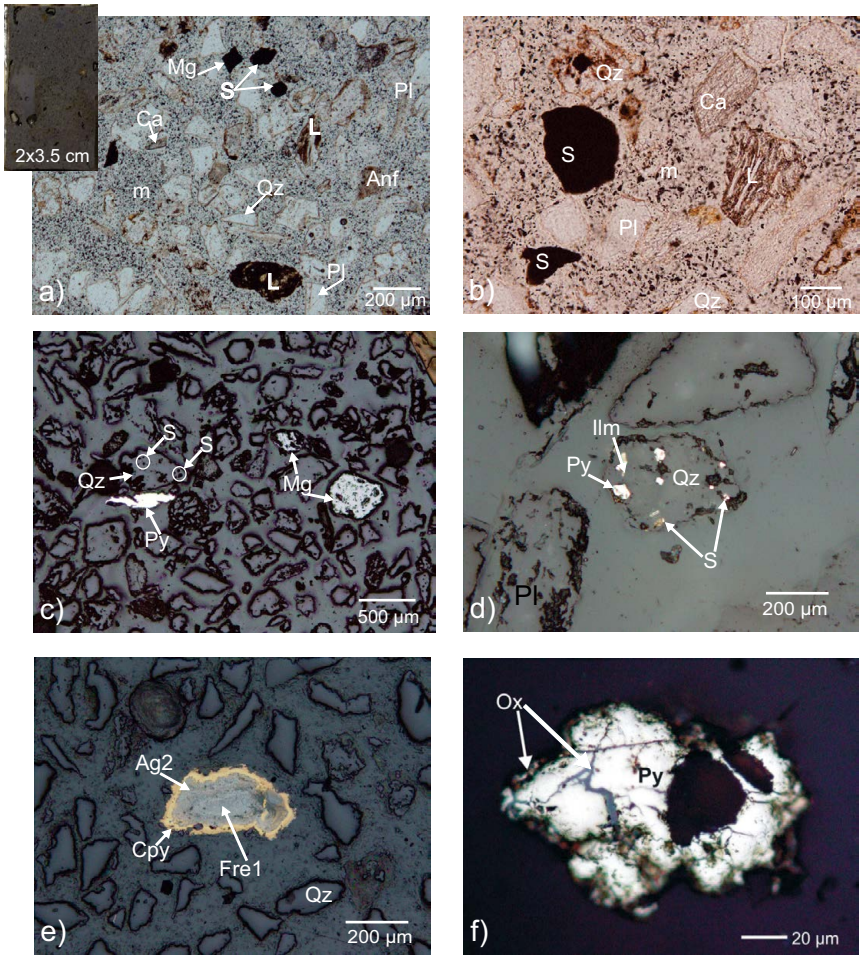


Figura 6. Fotomicrografías ópticas de los jales del DIMITO. a y b) Luz transmitida, EVII-H2, Tiro México. Notar en el extremo superior izquierdo, la foto de la briqueta de la muestra. c) Luz reflejada de separado de minerales opacos, EVII-H2. d) EVII-H3, inclusión de pirita en fragmento de cuarzo. e) Luz reflejada de sulfosal compleja de Ag-Sb-Au. f) Luz reflejada de clasto de pirita >100 µm con textura lamelar y bordes de hematita-goethita. Abreviaciones: calcita (Ca); magnetita (Mg); sulfuros (S); plagioclasa (Pl); Anfíbol (Anf); líticos (L); matriz (m); cuarzo (Qz); pirita (Py); ilmenita (Ilm); calcopirita (Cpy); freibergita (Fre1); aguilerita (Ag2); óxidos (Ox).

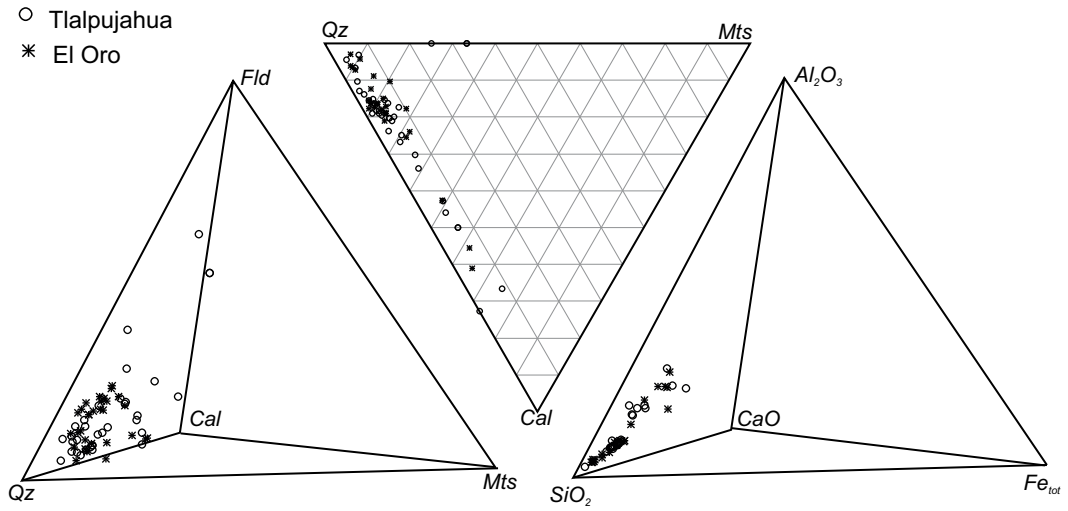


Figura 7. Diagramas tetraedrales y uno triangular que muestran la correlación geoquímica de los minerales esenciales (cuarzo, calcita, feldespatos, opacos; Tabla 3) y los elementos mayores (CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_{Total}; Tabla 4) de los jales del DIMITO. Abreviaciones: cuarzo (Qz), feldespatos (Fld), minerales opacos (Mts), calcita (Cal).

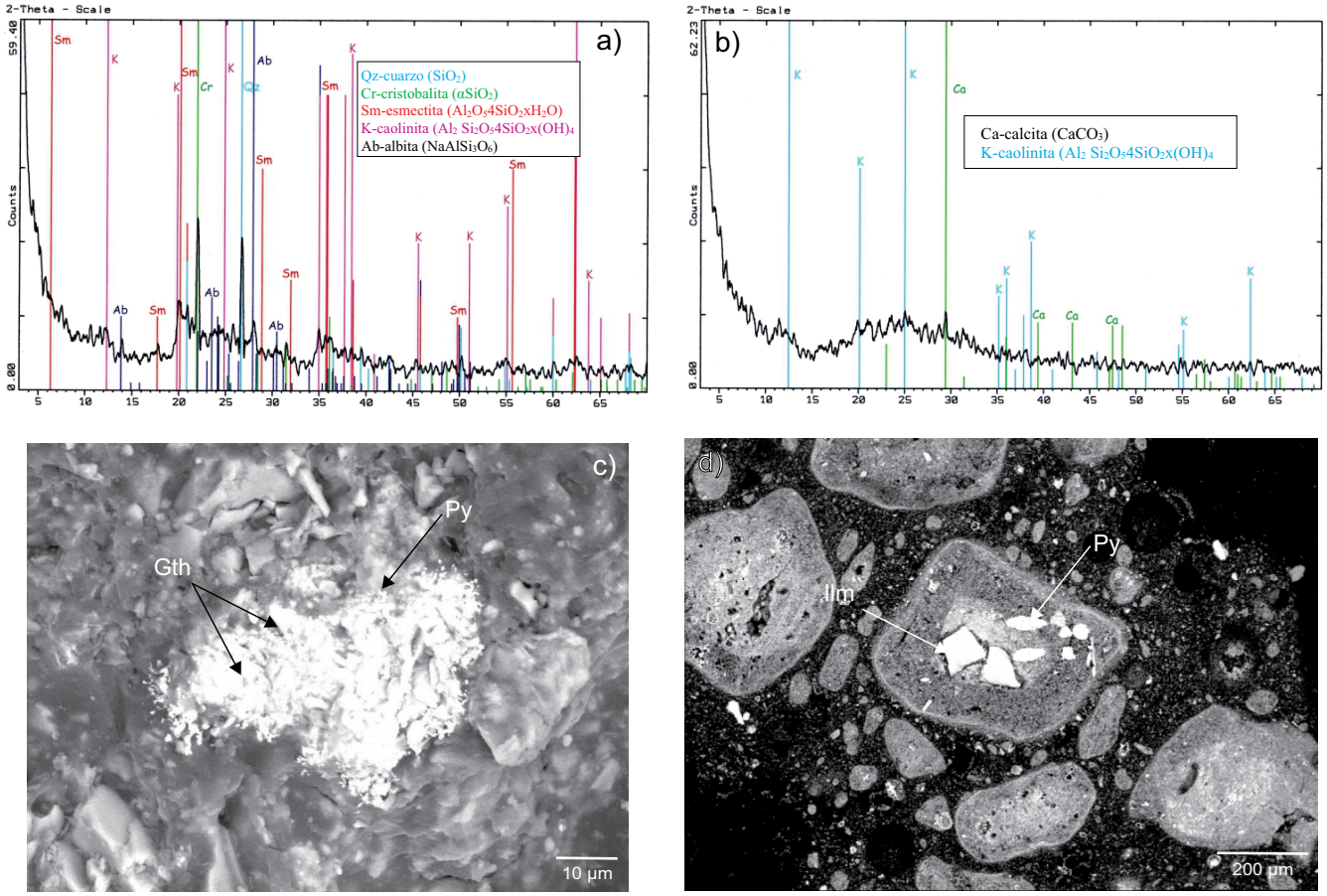


Figura 8. a y b) Difractogramas de polvos de jales y costras blanquecinas de los jales DIMITO. Variedades de sílice como el cuarzo (SiO_2) y cristobalita (αSiO_2), esmectita ($Al_2O_54SiO_2xH_2O$), caolinita (Al_2 $Si_2O_54SiO_2x(OH)_4$, albita ($NaAlSi_3O_6$), calcita ($CaCO_3$), magnetita (Fe_3O_4); hematita (Fe_2O_3), goethita [FeO(OH)]. c) Imágen de electrones retro-dispersados de pirita (Py) con textura esponjosa asociada con el desarrollo de goethita (Gth). d) Imágen de electrones retro-dispersados de fragmentos de pirita (Py) e ilmenita (Ilm) inalterados y encapsulados en un fragmento de cuarzo.

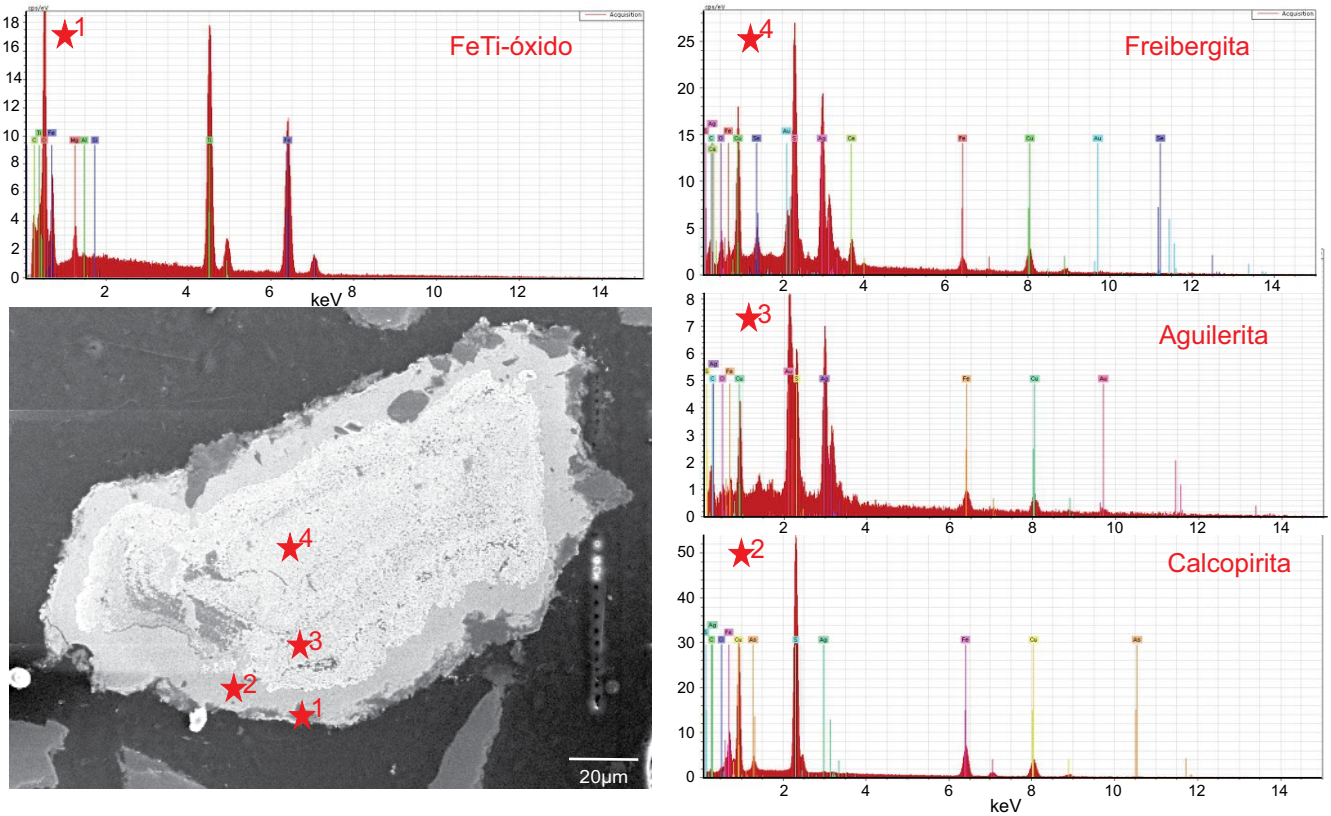


Figura 9. Imagen de electrones retro-dispersados y puntos de microanálisis semicuantitativos de Dispersión de Energía de rayos X. Notar la determinación de las fases del borde al nucleo: 1) óxido de hierro-titanio (ilmenita), 2) calcopirita, 3) aguilerita y 4) freibergita.

relativa dispersión, probablemente relacionada con la presencia de los carbonatos para el calcio y/o de material arcilloso para el hierro. La influencia de los carbonatos en las variaciones de CaO y Fe_{Total} es aún mas evidente en los diagramas *versus* el pH, donde sus mayores concentraciones, en particular las del calcio, se agrupan con los valores de pH ≥7.5. Por el contrario, estos elementos muestran un decremento exponencial en relación con los valores más bajos del pH <7 a 5, en coincidencia con las muestras de algunos horizontes basales de los perfiles III, XI de Tlalpujahua y VII y VIII de El Oro. Por su parte, el aluminio muestra una tendencia opuesta a la del calcio, el cual tiende a incrementarse en relación con la disminución del pH, sugiriendo una baja participación como potencial de neutralización de las arcillas y feldespatos.

En la Tabla 5 se presentan las concentraciones de 43 elementos traza determinados en 48 muestras de los jales del DIMITO, así como de dos muestras de terreros, en los que se analizaron los contenidos de Au y Ag. Se observa que las concentraciones de los lantánidos o Tierras Raras no muestran anomalías relevantes respecto a los valores estandard de un suelo (Markert, 1987). En la Figura 11 se presentan una serie de diagramas binarios que muestran la variación de las concentraciones de los EPT: Cu, As, Sb, Cd y de los EPE: Ag, Au, Pb, Zn en relación con las concentraciones del SiO_2 y los valores del pH. Para su comparación y análisis con los elementos mayores, las muestras han sido agrupadas como en la Figura 10, también se han incorporado los límites máximos permisibles de toxicidad para suelos (LMP) reportados por la Organización Mundial de Salud (WHO, 2015). Los jales del DIMITO muestran una tendencia geoquímica de EPT y EPE relativamente homogénea. Sin embargo, los horizontes basales de algunos depósitos de jales de El Oro (V, VII, VIII, XIV, Me07) y de Tlalpujahua (IX, XII), muestran mayores concentraciones de EPE y de Sb, Cd. Los EPT presentan concentraciones que varían de: As (25.2–40.5 g/ton), Cd (0.54–0.74 g/ton), Sb (43.9–72.2 g/ton), Cu (40.3–44.2 g/ton), Pb (53.3–145.2 g/ton) y Zn (155.9–354.5 g/ton). Aunque, aparentemente, las concentraciones de los EPT se encontrarían debajo de los LMP de la norma mexicana (SEMARNAT, 2011, NOM-157-2009), se observa que, de acuerdo a los LMP establecidos por la OMS (WHO, 2015), la concentración del Sb supera ampliamente el límite de alto riesgo (50 mg/kg). Del mismo modo, una docena de muestras con distribción aleatoria, muestran concentraciones de As, Zn y Pb que se encuentran ligeramente arriba de LMP de bajo riesgo (50 mg/kg, 250 mg/kg y 200 mg/kg, respectivamente), mientras que las concentraciones de Cu y Cd, se encuentran por debajo de ambas normas. Por otro lado, en la Figura 11, se observa una relativa tendencia lineal positiva entre el incremento de algunos valores de EPT (*e.g.* Sb, As) y EPE (*e.g.* Ag, Pb, Zn) con las concentraciones del SiO_2 >65 % y ligeramente con los valores de pH ≥7.5. Esta tendencia sugiere una estrecha relación entre estos elementos, bajo forma de sulfuros y sulfosales remanentes en el jal, así como que estarían asociados principalmente con el cuarzo, como estarían ligeramente subordinadas con un incremento de la matriz calcáreo-carbonosa. Por su parte, las concentraciones de los EPE para este tipo de depósito mineral (*e.g.* Au, Ag, Pb, Zn), ya sea en la mayoría de los jales como en las dos muestras de terreros (Te01, Te02), muestran valores que representarían *leyes mineras* potencialmente remunerables con valores medios de Au (1.2–1.61 g/ton), Ag (28.1–46.8 g/ton), Pb (53.3–145.2 g/ton) y Zn (155.9–354.5 g/ton). Estas *leyes* coinciden con los ensayes reportados por otros autores (Aguilar-Contreras, 1971; Candente, 2014). Es importante señalar que las concentraciones de

Tabla 4. Resultados geoquímicos de 48 muestras de jales del DIMITO. Los elementos mayores (%wt) fueron obtenidos por fluorescencia de rayos X (FRX).

	Muestra	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO_{total}	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	Suma	P x C
TLALPUJAHUA	EII-H1	69.88	0.31	6.19	3.42	0.08	0.68	3.81	0.26	1.86	0.19	86.67	14.14
	EII-H3	75.85	0.25	6.05	3.31	0.08	0.68	5.59	0.13	2.00	0.11	94.04	5.85
	EIII-H1	79.72	0.23	5.01	2.54	0.07	0.57	3.51	0.14	1.67	0.09	93.53	6.09
	EIII-H2	75.83	0.28	6.91	3.13	0.13	0.78	5.26	0.18	1.97	0.09	94.57	6.53
	EIII-H3	79.19	0.27	5.75	2.74	0.07	0.59	4.01	0.16	1.65	0.08	94.49	5.28
	EIII-H4	56.62	0.90	22.27	5.97	0.02	1.05	1.72	0.74	1.06	0.03	90.37	9.05
	EIII-H5	56.78	0.72	18.37	11.54	0.03	1.66	1.76	1.11	0.27	0.04	92.26	7.43
	EIII-H6	58.22	0.74	18.75	8.65	0.02	1.35	1.85	1.27	0.48	0.06	91.40	8.46
	EIII-H7	69.95	0.44	14.56	4.90	0.02	1.41	0.68	0.14	2.39	0.07	94.55	5.06
	EIV-H2	73.27	0.35	7.27	3.49	0.08	0.93	4.64	0.26	1.86	0.12	92.26	7.05
	EIX-H1	78.40	0.24	6.09	2.85	0.07	0.69	3.70	0.14	1.96	0.11	94.26	6.25
	EIX-H2	79.27	0.23	5.95	2.82	0.07	0.70	3.78	0.10	1.92	0.10	94.95	4.99
	EIX-H3	67.10	0.45	14.90	5.75	0.06	1.07	0.80	0.17	2.66	0.07	93.04	6.64
	EIX-H4	76.12	0.21	5.64	2.71	0.06	0.69	5.38	0.47	1.65	0.13	93.05	5.63
	EIX-H5	71.93	0.50	13.03	4.74	0.02	1.11	0.40	0.12	2.94	0.07	94.85	4.52
	EX-H2	74.65	0.26	6.45	2.99	0.08	0.71	5.65	0.23	2.08	0.11	93.20	6.04
	EX-H4	73.64	0.24	6.37	3.02	0.08	0.77	6.47	0.27	1.95	0.10	92.90	7.13
	EXI-H1	71.41	0.28	5.73	2.95	0.08	0.75	3.18	0.19	1.70	0.13	86.41	13.58
	EXI-H2	77.23	0.26	6.16	3.19	0.07	0.73	4.35	0.20	1.73	0.08	93.99	6.19
	EXI-H3	77.13	0.33	5.30	2.72	0.07	0.60	5.80	0.14	1.95	0.11	94.14	6.25
	EXI-H4	73.67	0.23	6.28	2.88	0.10	0.79	6.05	0.23	1.93	0.08	92.26	6.48
	EXI-H5	65.36	0.70	13.87	5.97	0.06	1.37	0.92	0.75	1.77	0.13	90.90	7.91
	EXI-H6	69.24	0.26	14.84	3.07	0.03	1.82	0.28	0.36	3.62	0.07	93.58	4.56
	EXII-H1	78.07	0.40	7.61	3.30	0.06	0.61	0.58	0.24	1.30	0.10	92.26	7.08
	EXII-H3	91.91	0.03	2.13	0.65	0.04	0.27	1.53	0.11	1.10	0.02	97.79	1.96
	EXII-H4	70.08	0.60	12.85	4.26	0.05	0.93	0.90	0.28	1.80	0.10	91.85	7.06
	EXIII-H1	78.28	0.22	5.86	2.87	0.08	0.61	4.48	0.10	1.75	0.09	94.32	5.06
	EXIII-H4	73.13	0.26	6.83	3.02	0.09	0.75	6.25	0.14	2.07	0.09	92.64	6.84
EL ORO	EV-H1	75.41	0.30	6.85	3.18	0.07	0.67	3.01	0.37	1.34	0.14	91.33	9.06
	EV-H2	75.63	0.24	6.06	3.04	0.07	0.65	5.79	0.25	1.36	0.11	93.20	6.46
	EV-H3A	83.70	0.16	3.80	2.14	0.05	0.47	4.22	0.22	0.99	0.09	95.83	4.25
	EV-H4	78.64	0.18	4.59	2.42	0.06	0.57	5.86	0.12	1.29	0.09	93.80	5.82
	EV-H5	71.36	0.23	6.48	3.37	0.10	0.69	7.55	0.21	1.51	0.12	91.61	7.45
	EV-H6	64.35	1.08	15.56	4.77	0.12	0.60	2.29	1.99	1.22	0.06	92.02	6.97
	EVII-H1	88.29	0.10	3.34	1.44	0.05	0.46	2.44	0.08	0.88	0.06	97.14	3.02
	EVII-H3	89.07	0.11	3.15	1.32	0.04	0.41	1.88	0.09	0.82	0.06	96.95	2.60
	EVII-H4	88.61	0.09	3.14	1.40	0.08	0.40	1.91	0.10	0.86	0.05	96.63	2.67
	EVII-H5	59.24	1.35	18.41	7.41	0.09	0.99	1.62	1.33	1.17	0.12	91.74	8.77
	EVII-H6	62.25	1.88	13.86	10.31	0.41	0.58	0.82	1.09	1.33	0.08	92.62	7.74
	EVII-H7	58.77	1.36	18.02	7.73	0.13	1.12	1.92	1.62	1.29	0.12	92.07	6.86
	ME07m	86.76	0.11	3.62	1.35	0.04	0.46	2.16	0.65	1.00	0.06	96.20	3.59
	ME07c	82.70	0.15	4.49	1.79	0.05	0.59	4.05	0.14	1.33	0.07	95.35	4.25
	EVIII-H1	88.95	0.11	3.41	1.53	0.04	0.46	2.21	0.32	0.89	0.06	97.97	2.69
	EVIII-H2	60.07	1.10	18.32	6.03	0.06	1.06	1.87	1.34	1.26	0.17	91.26	8.83
	EVIII-H3	88.04	0.14	3.83	1.70	0.04	0.45	1.80	0.19	0.96	0.07	97.22	2.54
	EVIII-H4	55.86	1.22	20.89	6.96	0.04	0.77	0.86	1.79	1.42	0.07	89.87	9.74
	EXIV-H2	69.22	0.46	10.45	3.92	0.08	0.62	4.85	0.57	0.93	0.17	91.26	8.11
	EXIV-H8	69.51	0.22	6.48	3.15	0.08	0.83	8.28	0.16	1.69	0.11	90.50	8.05

Au y Ag son similares en todo el DIMITO, mientras que es notable el incremento en un orden de hasta 2 a 5 de los valores de Zn-Pb, para las estaciones de El Oro. Finalmente, en relación con otros distritos mineros del país, se observa que los EPT de los jales DIMITO, incluyendo los valores de hierro, se agrupan bien con los datos de los distritos mineros epitermales de Guanajuato y Taxco (excepto Pb y As para este último), mientras que en general muestran claras diferencias con los distritos de Zimapan, Nacozari y Santa Bárbara, en congruencia con su naturaleza metalogénica diversa.

DISCUSIÓN

Balance de acidez y neutralización (ABA) de los jales del DIMITO

El balance de acidez (ABA) se refiere al uso de las bases de datos geoquímicas con la finalidad de predecir el riesgo de la generación de acidez de un yacimiento o un sistema de resiudos mineros (Paktunc 1999; Jambor 2003; Price, 2009). Para realizar el cálculo ABA fueron seleccionadas las muestras de cada horizonte basal de los 12 perfiles (ver Figura 4), considerando que en estos niveles se registraron los

valores más bajos de pH y las mayores concentraciones de sulfuros (*e.g.* EIII, EVIIl, VIII). Por medio del programa *ModAn* (Paktunc, 1998) se calcularon las proporciones modales de los minerales teóricos de los horizontes seleccionados (Tabla 6). El cálculo se basa en la normalización de la composición química de elementos mayores y se aplica una técnica de eliminación gaussiana y de regresión múltiple en el balance estequiométrico de las ecuaciones que involucran las fases previamente identificadas por petrografía. Se determinaron los valores teóricos de potencial de acidez (PA) y potencial de neutralización (PN) para cada horizonte. Los valores teóricos (ABA_1), se refieren sólo a los carbonatos presentes según la ecuación 1:

$$4FeS_2\,(s) + 8CaCO_3\,(s) + 15O_2\,(g) + 6H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3(s) + 8SO_4^{2-}\,(aq) + 8Ca^{2+}\,(aq) + 8CO_2 \quad (1)$$

Sin embargo, para considerar otras especies minerales que al disolverse podrían generar una relativa neutralización, se realizó una corrección de calcita + silicatos ó ABA_2 que incluye el valor de los Al-silicatos (Jambor *et al.*, 2004; plagioclasa, anfíbol, clorita, etc.), relacionados con la ecuación general 2:

$$CaAl_2Si_2O_8\,(s) + 2\,H^+\,(aq) + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + Al_2Si_2O_5(OH)_4\,(s) \quad (2)$$

A pesar de la baja tasa de intemperismo y de los bajos valores de neutralización de los silicatos de aluminio (*e.g.* feldespatos, anfíboles) respecto a los carbonatos, en algunos horizontes (*e.g.* EIX, EX, EV, XIV) se observa que su abundancia relativa podría influir para estabilizar las muestras en correspondencia con bajos contenidos de $CaCO_3$, o bien en la perspectiva de un mayor tiempo de exposición e intemperismo de los jales.

En la Tabla 6 y en la Figura 12 se presentan los resultados del cálculo de potencial de neutralización (PN_1 y PN_2), potencial de acidez (PA), así como los cocientes de neutralización (ABA_1 y ABA_2). En general se observa que los jales del DIMITO muestran valores de PA muy bajos (8.5–27 Kg_{CaCO3}/ton), en correspondencia con un alto potencial de neutralización (76.1–155.2 Kg_{CaCO3}/ton), excepto en dos

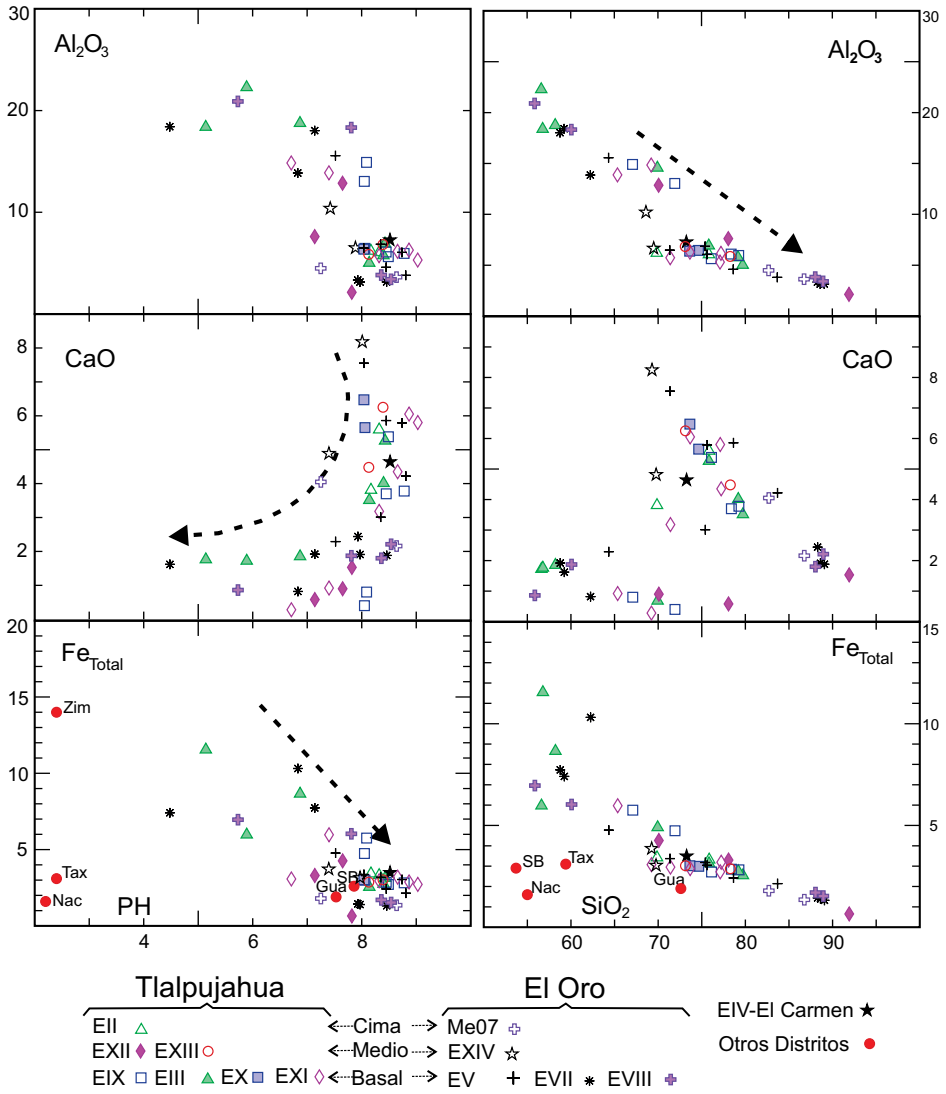


Figura 10. Diagramas comparativos entre las concentraciones (%wt) de los elementos mayores SiO_2, Al_2O_3, CaO y Fe_{Total} y el pH de los jales del DIMITO. Notar los grupos de símbolos por ubicación de cima, intermedio y base del perfil o estación de los jales del DIMITO (Ver Figura 2 y Figura 4). Para su comparación se incluye la proyección de los datos de otros distritos mineros del país (Guanajuato (Ramos-Arroyo *et al.*, 2004); Taxco (Talavera *et al.*, 2005; Armienta *et al.* 2003); Zimapán (Armienta y Segovia, 2008) y Santa Bárbara (Martín-Romero *et al.*, 2008).

Tabla 5. Resultados geoquímicos de 48 muestras de jales del DIMITO analizados por medio de espectrometría de masas con plasma (ICP-MS) y dos muestras de terreros (Te01, Te02), analizados por medio de espectrometría de absorción atómica (AA).

Muestra	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Pd	Ag	Cd	Sn	Sb	Cs	Ba	Hf	Ta	Pt	Au	Pb	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Lu
TLAPUJAHUA																																										
EII-H1	3	6	89	23	14	25	31	134	67	87	157	15	62	3	1	1	28	1	2	55	11	326	2	0	0	1	35	3	2	50	36	31	25	17	9	11	11	9	9	9	8	8
EII-H3	3	7	99	15	18	28	37	156	84	103	151	17	62	3	1	1	38	1	1	68	13	324	2	0	0	1	40	3	2	46	33	28	23	17	10	12	11	10	10	10	9	9
EIII-H1	3	5	72	0	10	18	29	116	51	83	115	14	55	2	1	1	39	1	1	67	11	280	2	0	0	2	51	2	2	42	29	25	21	15	8	10	9	8	8	8	7	8
EIII-H2	5	8	97	25	10	20	44	147	64	97	137	18	74	3	2	1	26	1	1	69	13	421	2	0	0	1	70	3	2	55	37	34	28	19	11	13	12	11	11	10	10	10
EIII-H3	3	6	75	0	16	21	36	123	55	81	130	15	60	2	2	1	39	1	3	66	11	313	2	0	0	2	60	3	2	46	31	28	23	16	9	11	10	9	9	8	8	8
EIII-H4	3	20	131	39	9	18	25	90	5	49	142	32	227	12	1	1	3	0	2	6	17	403	6	1	0	1	17	8	3	119	67	80	60	38	25	23	22	19	19	18	17	18
EIII-H5	3	22	62	0	11	12	17	125	3	7	138	72	392	15	0	2	2	0	3	5	2	296	11	1	0	1	19	9	1	283	123	185	149	90	53	59	54	44	42	38	33	33
EIII-H6	4	21	54	0	9	15	18	151	8	15	145	71	386	17	1	2	5	1	3	14	4	421	10	1	0	1	24	9	1	301	148	215	172	109	65	67	63	51	47	42	38	38
EIII-H7	2	15	146	14	10	23	36	122	4	97	67	81	144	5	0	2	3	0	2	4	15	365	4	0	0	1	16	9	3	222	94	141	117	76	47	54	52	46	45	43	38	40
EIV-H2	3	8	100	43	16	25	37	137	53	84	131	17	53	2	1	1	34	1	1	52	12	340	1	0	0	1	55	3	2	50	37	31	25	18	11	12	12	11	11	10	9	10
EIX-H1	4	6	92	29	11	22	38	130	62	97	126	17	59	2	1	1	19	1	1	68	13	306	2	0	0	1	50	3	3	46	33	28	24	17	10	12	11	10	10	9	9	9
EIX-H2	2	15	108	53	12	24	46	113	22	129	19	36	85	4	2	1	5	0	2	8	19	501	3	0	0	1	24	8	3	117	76	75	56	37	18	24	24	22	22	21	21	22
EIX-H3	3	17	138	54	8	39	145	402	34	149	34	48	159	7	2	1	56	0	3	29	25	603	5	1	0	1	32	9	5	146	87	101	81	53	30	34	32	28	28	27	25	26
EIX-H4	2	4	63	49	12	15	41	198	36	54	110	12	26	1	1	1	18	1	4	59	9	195	1	0	0	3	121	2	3	33	23	20	16	11	6	8	8	7	7	6	6	6
EIX-H5	2	16	117	54	13	26	47	117	24	142	23	37	141	5	2	1	7	0	3	11	19	544	4	0	0	1	24	9	3	121	82	77	61	39	19	26	25	23	23	22	21	23
EX-H2	3	7	99	7	15	24	33	154	59	103	158	17	43	1	1	1	29	1	1	61	13	326	1	0	0	1	46	3	3	49	35	31	25	18	10	12	12	11	10	10	9	9
EX-H4	4	6	99	9	16	25	68	186	71	96	176	17	43	1	2	1	57	1	1	62	12	321	1	0	0	1	84	3	2	46	33	29	24	17	10	11	11	10	10	9	9	9
EXI-H1	3	6	83	52	14	19	35	166	50	79	101	14	45	2	1	1	35	1	1	52	11	272	1	0	0	1	63	2	2	41	30	25	21	15	8	10	9	8	8	8	7	8
EXI-H2	4	6	87	20	13	20	36	193	71	84	141	13	34	1	1	1	43	1	1	58	11	292	1	0	0	1	121	2	2	39	29	24	20	14	8	9	9	8	8	8	7	7
EXI-H3	3	5	66	0	12	20	27	96	46	85	136	14	34	1	1	1	28	1	0	48	10	257	1	0	0	1	33	2	2	42	31	25	21	15	8	10	10	9	9	8	8	8
EXI-H4	4	6	92	0	14	21	55	187	59	99	147	17	57	2	1	1	50	1	2	65	13	337	1	0	0	1	99	3	2	49	35	30	24	17	9	12	11	10	10	10	9	10
EXI-H5	2	17	215	91	28	50	65	124	16	92	74	29	140	8	2	1	25	0	2	11	20	525	4	1	0	1	73	6	3	114	69	64	49	28	17	19	19	17	17	17	16	17
EXI-H6	2	8	75	4	7	23	30	113	8	151	23	50	133	13	4	1	2	0	2	8	27	1172	5	1	0	1	17	21	8	217	125	113	83	50	23	34	31	27	27	26	24	26
EXII-H1	4	7	71	0	13	18	21	258	24	75	63	17	78	4	1	1	59	1	2	45	10	358	2	0	0	3	48	4	2	60	43	35	27	18	9	12	11	10	10	10	9	10
EXII-H3	7	0	11	0	17	3	18	99	23	63	87	3	16	0	0	0	47	0	0	106	9	108	0	0	0	2	42	0	0	7	5	5	4	4	2	2	2	2	2	2	2	2
EXII-H4	2	12	113	26	16	32	25	180	27	98	71	29	110	7	1	1	8	1	2	17	14	804	3	1	0	1	34	8	4	124	79	76	58	35	19	23	22	19	18	18	17	18
EXIII-H1	4	6	87	15	11	22	50	152	65	88	158	16	58	2	2	1	33	1	3	73	12	325	2	0	0	1	116	3	3	45	32	28	23	16	9	11	11	10	10	9	9	9
EXIII-H4	3	7	92	24	9	20	35	178	55	102	151	18	61	2	2	1	51	1	1	53	13	365	2	0	0	1	79	3	2	53	38	32	26	18	10	12	12	11	11	10	9	10
Te 01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	123	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Te02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EL ORO																																										
EV-H1	3	6	73	0	10	17	49	511	35	66	125	17	54	2	1	1	33	1	4	66	9	288	2	0	0	1	184	4	2	55	41	33	26	18	10	12	12	11	10	10	9	9
EV-H2	3	6	78	18	10	18	46	486	42	67	170	16	58	3	1	1	28	1	4	88	10	274	2	0	0	1	198	3	2	46	34	28	23	16	9	11	10	9	9	9	8	8
EV-H3A	2	3	46	0	7	13	43	298	29	45	128	9	38	1	1	1	46	1	2	97	8	179	1	0	0	1	122	2	1	27	19	16	13	10	5	7	6	6	5	5	5	5
EV-H4	3	6	81	0	10	21	55	437	48	73	199	17	64	2	1	1	30	1	5	82	11	307	2	0	0	2	247	3	2	55	39	32	26	18	9	12	12	11	10	10	9	9
EV-H5	2	4	55	0	8	14	44	299	34	56	143	12	45	2	1	1	40	1	3	80	9	229	1	0	0	1	184	2	2	35	25	21	17	12	6	8	8	7	7	7	7	7

continúa

Tabla 5 (continuación). Resultados geoquímicos de 48 muestras de jales del DIMITO analizados por medio de espectrometría de masas con plasma (ICP-MS).

	EL ORO (continuación)																																																	
Muestra	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Pd	Ag	Cd	Sn	Sb	Cs	Ba	Hf	Ta	Pt	Au	Pb	Th	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Lu
EV-H6	3	11	89	40	17	14	21	64	5	60	198	41	198	16	1	1	2	0	2	3	4	498	5	1	0	1	26	11	3	208	183	128	97	58	37	38	33	27	25	23	21	20
EVII-H1	2	3	41	0	16	9	21	527	30	46	70	10	34	1	0	1	71	0	1	124	8	141	1	0	0	2	317	2	1	27	19	16	13	10	4	7	6	6	6	5	5	5
EVII-H3	2	3	42	0	9	14	314	520	27	43	63	9	35	1	0	0	178	0	1	128	8	136	1	0	0	4	164	2	1	23	17	14	12	9	4	6	6	5	5	5	5	5
EVII-H4	2	3	38	5	15	77	809	451	23	46	63	9	33	1	1	1	60	1	1	133	8	160	1	0	0	2	190	2	1	23	17	14	12	9	4	6	6	6	5	5	5	5
EVII-H5	3	16	146	86	24	45	41	371	11	55	191	27	205	15	4	1	12	0	2	19	6	367	6	1	0	2	27	11	3	117	93	78	61	38	25	24	21	18	17	15	14	15
EVII-H6	3	14	173	60	38	24	27	262	7	63	236	36	220	15	3	1	5	0	2	5	6	343	6	1	0	1	23	16	3	353	252	183	129	64	31	38	31	24	22	20	19	19
EVII-H7	3	13	233	71	54	14	65	79	7	50	131	22	276	18	6	1	3	0	2	2	5	492	8	1	0	1	34	11	4	100	198	69	52	34	22	23	19	16	15	14	14	15
ME07m	2	3	42	0	50	33	89	548	28	51	59	11	35	1	1	1	108	1	1	129	5	139	1	0	0	3	115	2	1	28	20	17	14	10	5	7	7	6	6	6	6	6
ME07c	2	4	58	11	12	14	32	253	41	68	112	13	41	1	1	1	108	1	1	115	10	232	1	0	0	2	232	3	2	37	26	22	18	13	6	9	8	8	8	7	7	7
EVIII-H1	2	3	43	0	16	13	67	388	33	44	64	10	35	1	1	0	73	1	1	129	9	146	1	0	0	1	248	2	1	26	18	15	13	9	4	6	6	6	6	6	5	5
EVIII-H2	2	15	121	0	25	29	59	192	15	48	223	22	191	10	4	1	13	0	2	23	5	421	6	1	0	2	41	7	3	95	83	60	46	30	20	19	17	15	13	13	12	12
EVIII-H3	2	3	49	0	17	10	31	396	23	49	67	11	39	2	2	1	62	0	1	110	9	178	1	0	0	2	196	2	2	34	23	19	16	11	5	8	7	7	7	6	6	6
EVIII-H4	2	15	137	57	27	23	20	73	5	46	168	17	218	12	2	1	3	0	2	3	4	466	6	1	0	1	17	7	3	81	61	54	40	27	19	16	14	12	11	11	10	11
EXIV-H2	2	4	47	36	5	12	20	472	14	28	120	12	67	2	1	1	8	1	4	38	5	185	2	0	0	2	104	3	2	44	33	28	23	16	9	10	9	8	7	7	7	6
EXIV-H8	2	7	86	0	8	20	44	466	47	78	207	18	61	2	1	1	54	2	4	71	11	317	2	0	0	1	235	3	3	49	35	29	24	17	9	11	11	10	11	10	9	9

estaciones (EIII y EXI), que muestran los valores más bajos de PN (49–51.5 Kg_{CaCO3}/ton). Los cocientes ABA_1 y ABA_2 de todas las muestras se encuentran con valores PN/PA de una completa neutralización (Figura 12a). En la figura 12b se presentan los datos proyectados en el diagrama de Smart (2002), en el que se observa que todas las muestras se agrupan en el campo de "no acidez", incluso por debajo de los radios PN/PA=2. Es decir, que el modelo matemático sugiere un relativo *bajo o nulo riesgo* en la generación de drenaje ácido para los jales del DIMITO. Este resultado se debe esencialmente a un bajo contenido modal y normativo de sulfuros que da lugar a los valores bajos de PA y que se mantienen siempre muy inferiores a los valores del PN. Sin embargo, es importante asumir que este hipotético y optimista bajo potencial de generación DAM, por su misma simplicidad, requiere ser constatado y comparado con los valores de un muestreo de agua a lo largo de los cauces fluviales naturales y drenaje de mina. Del mismo modo, es importante señalar que el bajo riesgo de generación de DAM no excluye *a priori* el riesgo de la movilidad de los EPT. De hecho, ha sido bien reconocido desde hace años que un sistema de jales de neutro o alcalino, similar a los jales DIMITO, puede estar asociado al decremento de la concentración $(SO_4)^{2+}$ y del Eh, los cuales generan condiciones para la liberación de EPT a través de los poros de agua (Moncur *et al*., 2015; Parbhakar-Fox, 2017). Por lo tanto, particular atención requeriría el Sb, por registrar concentraciones muy superiores a los LMP, así como el Pb y el As por su reconocida movilidad en suelos y agua, así como por la toxicidad de su eventual ingestión.

Intemperismo, oxidación de sulfuros y minerales secundarios

El principal factor que influye en la transformación y alteración de los jales del DIMITO se refiere al clima. Los factores determinantes son: una precipitación media ≥800 mm/año, la condición torrencial del 67 % de la lluvia concentrada en tres meses (Martínez-Medina, 2009), así como las geoformas con fuertes pendientes, dando origen a un intenso proceso de erosión activo de los depósitos de jales deleznables. Los numerosos canales y cárcavas de erosión (Figura 3f) representan ya sea una vía de transporte fluvial como una tendencia natural para la pérdida de volumen. Si se considera que se ha documentado un volumen mínimo histórico de 60 Mt de jales en el DIMITO (Uribe-Salas, 2008), así como la estimación de la pérdida de su volumen original en al menos el 27 % (Corona-Chávez *et al*., 2010), implicaría que actualmente restarían aproximadamente 43.8 Mt distribuidas en un área de 622,764.22 m^2, correspondiente al área actual mapeada para las cinco áreas de depósitos de jales del DIMITO. Por otro lado, considerando la pérdida mínima de ese volumen hasta el año de 2008, es decir durante al menos 60 años, también representaría una tasa de erosión de aproximadamente 230 ton/año de material que se transportaría gradualmente hacia el depocentro de la cuenca hidrológica. Por lo tanto, en cualquier interpretación o plan de manejo de residuos mineros, es necesario considerar la separación activa grano a grano por erosión de los jales del DIMITO.

En relación con la influencia del tamaño de grano, los jales del DIMITO presentan un predominio de tipo limoso (>75 %; Figura 5). Estas dimensiones de grano, asociadas con una estructura deleznable, implican que las fracciones finas entre 4 y 64 μm puedan ser fácilmente removidas durante el proceso de infiltración y circulación (*seepage*) de agua. La fracción fina estaría además constiuida en gran parte por el material fino calcáreo-carbonoso y arcilloso, con altos valores de sulfuros reportados en los ensayes metalúrgicos (Aguilar-Contreras, 1971), por lo cual su remoción hacia las zonas bajas de la cuenca hidrológica, daría lugar a una fuerte dispersión de contaminantes en estado sólido, así como también una notable disminución *in situ* de las concentraciones de sulfuros como la galena, esfalerita y de la pirita. Sin embargo, los resultados de granulometría y de análisis químicos de los

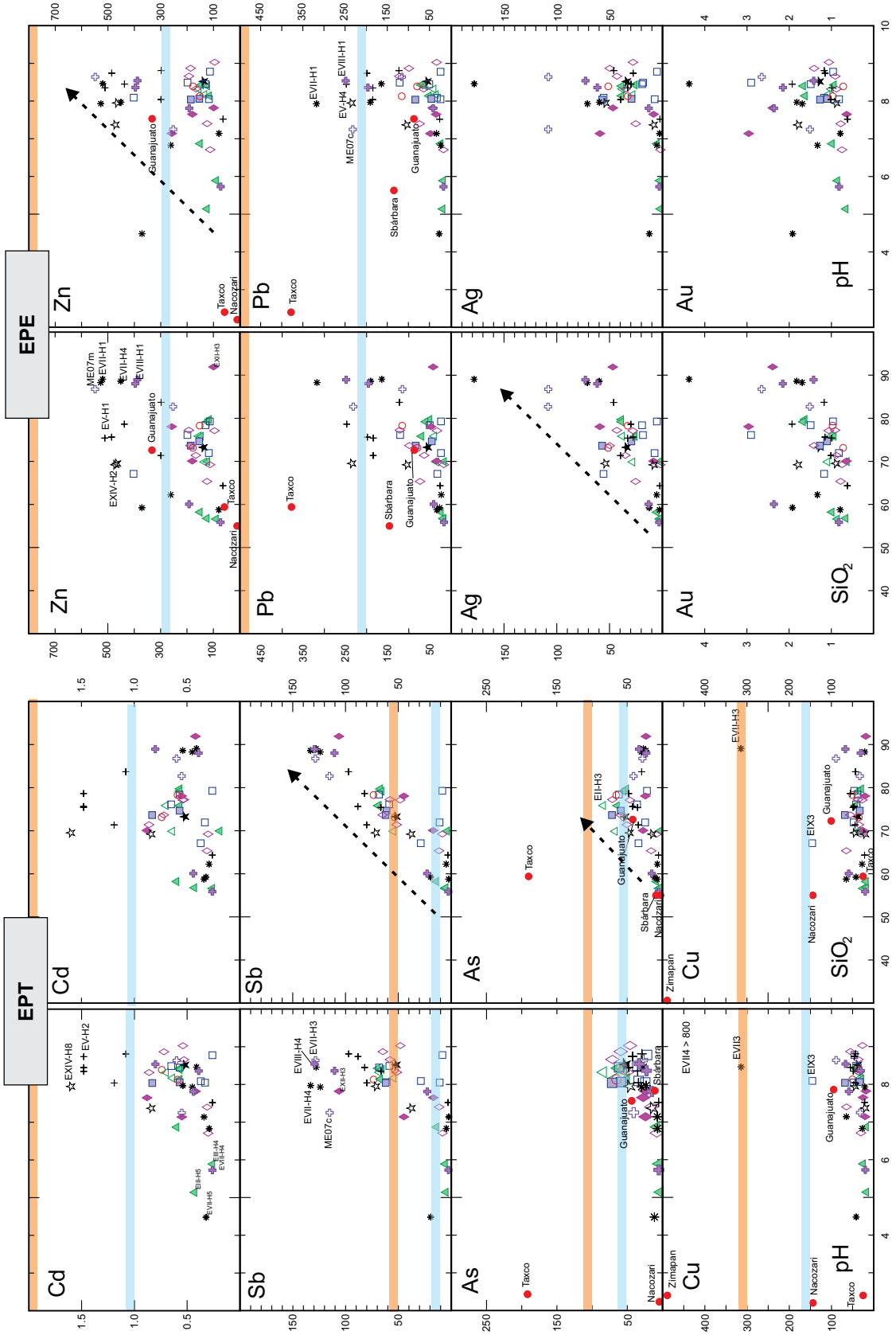


Figura 11. Diagramas comparativos entre SiO_2 (%w) y pH *vs.* los elementos en traza (ppm) de los jales del DIMITO. A la izquierda elementos potencialmente tóxicos (EPT: As, Cu, Cd, Sb); a la derecha, elementos potencialmente económicos (EPE: Au, Ag, Pb, Zn). Para su comparación, datos de otros distritos mineros como en la Figura10. Notar las concentraciones consideradas como los límites máximos permisibles (LMP) para suelos de acuerdo a la Organización Mundial de Salud (WHO, 2015): de bajo riesgo (azul) y alto riesgo (naranja).

jales indican que existe aún una abundante fracción fina de material remanente, la cual incrementaría la tasa de disolución y la superficie potencial de reacción de los minerales (Jambor 2003; Jamieson *et al*., 2015). Por lo tanto, se requeriría hacer un estudio específico de separación secuencial, con la finalidad de ponderar el efecto y el consumo molar de la matriz calcáreo-arcillosa de los jales DIMITO.

En relación con la alteración de los clastos >64 µm o arenas finas, con base en el análisis mineralógico es posible resaltar un proceso de intemperismo selectivo en los jales DIMITO. Los tectosilicatos (cuarzo y feldespatos), así como los óxidos y los sulfuros incluidos en el cuarzo bajo forma de inclusiones, se encuentran relativamenten bien preservados. Por su parte, los clastos de los líticos y de las sulfosales muestran una alteración heterogénea; varían desde un delgado borde de oxidación de hematita-goethita, hasta un aspecto poroso o esqueletal, con texturas lamelares con pequeños nucleos relictos. Las texturas de mayor alteración son mucho más comunes en los fragmentos aislados de pirita y de algunos óxidos con dimensiones de 64–300 µm (Figuras 6f, 8c). De acuerdo al *Indice de Alteración de los Sulfuros* (SAI), propuesto por Moncur *et al*. (2005), mientras que los granos aislados de pirita y óxidos exhibirían un SAI >6, los líticos, tectosilicatos y los granos encapsulados de sulfuros en cuarzo podrían corresponder a un SAI ≤2. En relación con los procesos de alteración y la precipitación de minerales secundarios,

Tabla 6. Estimación de la mineralogía normativa y del potencial de neutralización (PN) y acidez (PA), así como su balance ácido-base (ABA), utilizando los softwares *ModAn* y mNP y el método de Paktunc (1998; 1999; 2003). Las concentraciones de los elementos mayores en óxidos (%wt). PN1 y ABA1 corresponden al cálculo sin considerar la influencia de neutralización los silicatos. PN2, ABA2 corresponden al cálculo con las correcciones del PN de calcita+silicatos para los Al-silicatos usados por Jambor *et al*. (2004). Abreviaciones: calcita (Cal); cuarzo (Qz); ortoclasa (Ort); hornblenda (Hn), ilmenita (Ilm); hematita (Hem); illita (Ilt), albita (Alb); rodocrosita (Rod); clorita (Clt); pirita (Py).

Elemento	EII-H3	EIII-H7	EIV-H2	EIX-H5	EX-H4	EXI-H6	EXII-H4	EXIII-H4	EV-H6	EVII-H7	EVIII-H4	EXIV-H8
SiO_2	75.85	69.95	73.27	71.93	73.64	69.24	70.08	73.13	64.35	58.77	55.86	69.51
TiO_2	0.25	0.44	0.35	0.50	0.24	0.26	0.60	0.26	1.08	1.36	1.22	0.22
Al_2O_3	6.05	14.56	7.27	13.03	6.37	14.84	12.85	6.83	15.56	18.02	20.89	6.48
FeOt	3.31	4.90	3.49	4.74	3.02	3.07	4.26	3.02	4.77	7.73	6.96	3.15
MnO	0.08	0.02	0.08	0.02	0.08	0.03	0.05	0.09	0.12	0.13	0.04	0.08
MgO	0.68	1.41	0.93	1.11	0.77	1.82	0.93	0.75	0.60	1.12	0.77	0.83
CaO	5.59	0.68	4.64	0.40	6.47	0.28	0.90	6.25	2.29	1.92	0.86	8.28
Na_2O	0.13	0.14	0.26	0.12	0.27	0.36	0.28	0.14	1.99	1.62	1.79	0.16
K_2O	2.00	2.39	1.86	2.94	1.95	3.62	1.80	2.07	1.22	1.29	1.42	1.69
P_2O_5	0.11	0.07	0.12	0.07	0.10	0.07	0.10	0.09	0.06	0.12	0.07	0.11
Suma	94.04	94.55	92.26	94.85	92.90	93.58	91.85	92.64	92.02	92.07	89.87	90.50
P x C	5.85	5.06	7.05	4.52	7.13	4.56	7.06	6.84	6.97	6.86	9.74	8.05
S	0.34	0.70	0.46	0.55	0.38	0.91	0.47	0.37	0.30	0.56	0.38	0.41
CO2	4.39	3.80	5.29	3.39	5.35	3.42	5.30	5.13	5.23	5.15	7.31	6.04
Mineralogía modal calculada (Paktunc, 2001)												
Cal	9.45	3.19	9.15	6.81	11.17	2.13	4.64	11.45	6.41	5.83	5.88	13.98
Qz	63.29	44.73	59.45	45.33	60.18	40.89	47.56	61.90	32.33	22.83	14.51	57.68
Ort	7.28	0.00	4.72	4.77	6.42	7.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.53
Hn	3.84	1.84	2.17	6.32	3.85	4.07	0.00	3.26	0.00	0.29	0.00	5.51
Ilm	0.39	0.77	0.59	0.68	0.40	0.39	1.14	0.49	2.04	2.58	2.20	0.30
Hem	2.17	3.96	2.76	3.31	2.37	1.65	0.57	2.37	1.36	6.78	2.20	2.36
Ilt	12.20	41.16	17.32	31.61	12.85	37.11	30.60	19.64	30.87	42.22	42.16	14.86
Alb	0.49	1.35	1.87	0.00	1.68	2.42	2.65	0.00	16.12	16.91	17.64	0.00
Rod	0.30	1.74	1.08	0.19	0.40	1.84	2.27	0.20	1.84	2.01	3.21	0.00
Clt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.66	0.00	8.45	0.00	11.67	0.00
Py	0.59	1.26	0.89	0.97	0.69	1.65	0.89	0.69	0.58	0.57	0.52	0.79
Suma	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Corrección Calcita+Silicatos(%Calcita; Paktunc, 2001; 2003; Jambor et al., 2004))												
	11.23	4.9045	11.106	8.7085	13.159	5.1502	7.6118	12.277	11.878	10.885	12.762	15.521
Potencial de Neutralización/Acidez y Balance de Neutralización (Paktunc, 2003)												
PN_1 ($KgCaCO_3$req/t)	97	47	100.8	69.7	115.1	37.3	66.1	116.1	80.1	75.7	86.7	39.7
PA_1 ($KgCaCO_3$req/t)	9.6	20.6	14.5	15.8	11.3	27	14.5	11.3	9.5	9.3	8.5	12.9
ABA_1 ($KgCaCO_3$req/t)	87.4	26.4	86.3	53.9	103.8	10.3	51.6	104.8	70.6	66.4	78.2	26.8
Potencial de Neutralización/Acidez y Balance de Neutralización (Paktunc, 2003; Jambor et al., 2004)												
PN_2 ($KgCaCO_3$req/t)	112.2	49	111	87.08	131.05	51.5	76.1	122.8	118.8	108.9	127.6	155.2
PA_2 ($KgCaCO_3$req/t)	9.6	20.6	14.5	15.8	11.3	27	14.5	11.3	9.5	9.3	8.5	12.9
ABA_2 ($KgCaCO_3$req/t)	102.6	28.4	96.5	71.28	119.75	24.5	61.6	111.5	109.3	99.6	119.1	142.3
Potencial de Drenaje Acido (Paktunc, 2003)												
Potencial DAM	No	bajo	No	No	No	posible	No	No	No	No	No	No

el clima templado-frío y la precipitación entre 800 y 1,100 mm anuales de agua del DIMITO, conforman un sistema hidrodinámico extraordinario que podría afectar en forma drástica los procesos de oxidación, de disolución y, por lo tanto, la precipitación de minerales secundarios. Un sistema de alta energía hidraúlica, ya sea por infiltración o circulación y escorrentía aparentemente no favorecería los procesos de reacción relativamente lentos y, en particular, la estabilidad de la precipitación de los minerales secundarios (Blowes y Jambor, 1994; Parbhakar-Fox, 2017). Así mismo, algunos procesos de oxidación e hidrólisis para la disolución de los cationes (Fe^{2+}) entre poros serían intermitentes y en muchos casos, las superficies de los minerales secundarios podrían ser removidas por disolución en los flujos de circulación del sistema del jal. Este proceso hidrodinámico, podría explicar por qué los jales del DIMITO, excepto tres delgados horizontes basales (EIII, EVII, EVIII), muestran una relativa homogeneidad ligeramente alcalina, independientemente de su posición vertical. Además, no se observaron crestones de grandes dimensiones (*hardpan*), como tampoco se identificaron sulfatos en campo, ya sea en las delgadas costras blanquecinas generadas por eflorescencia como en microscopía en los bordes de grano. En las costras de eflorescencia predominan por su abundancia minerales secundarios como: calcita ($CaCO_3$) y arcillas (caolinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, como en lixiviados se observó esmectita $Al_2O_54SiO_2xH_2O$), y sílice (amorfa, cristobalita αSiO_2). Por su parte, los hidróxidos (goethite α-FeOOH; hematita ferrihidrita Fe_5HO_8) se observaron en las costras, y son más abundantes en algunos flóculos donde hay mayor flujo de agua.

Por último, en relación con algunos horizontes basales de los jales DIMITO con pH <6 y que muestran una relación PN/PA≈ 2 (EIII, EIX, EXI, EXII), es importante hacer notar que sus valores calculados de ABA se deben realmente a un bajo PN, más que a un valor anómalo de PA; es decir, que estos horizontes presentan una relativa deficiencia de carbonatos, más que una mayor abundancia de sulfuros. Aunque esta variación de alcalinidad podría ser interpretada como un simple decremento de calcita (*bulk*), es importante hacer notar su coincidente posición basal. Su importancia radica en que señalaría la presencia de un proceso de lixiviación y diferenciación geoquímica activos relacionados con la circulación del agua de los jales. Por lo tanto, resulta relevante estimar la variación temporal e *in situ* de la composición del agua y de los horizontes basales de los jales del DIMITO.

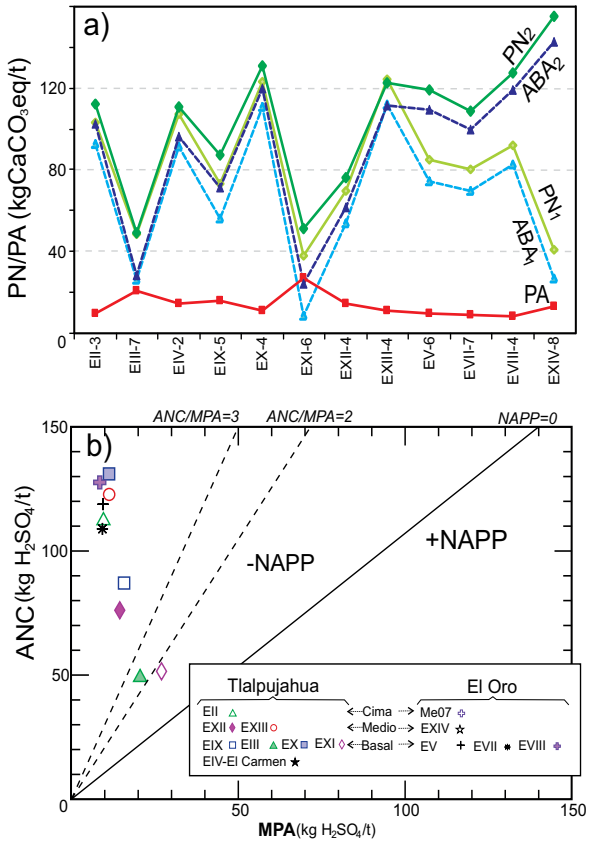


Figura 12. Diagramas que muestran las variaciones de la estimación del potencial de neutralización (PN) y acidez (PA), así como su balance ácido-base (ABA). a) Gráficas con las curvas de los cálculos para cada muestra. PN1 y ABA1 corresponden al cálculo sin considerar la influencia de neutralización los silicatos. PN2, ABA2 corresponden al cálculo con las correcciones del PN de calcita+silicatos para los Al-silicatos usados por Jambor *et al.* (2004). b) Diagrama de Smart *et al.* (2002). Por sus siglas en inglés: Potencial máximo de acidez (MPA); Capacidad de neutralización de acidez (ANC) y Potencial (positivo o negativo) neto de acidez (NAPP). Para el cálculo se utilizaron los softwares Modan y *m*NP y el método de Paktunc (1998; 1999; 2003), así como las correcciones ponderadas de PN para los Al-silicatos usados por Jambor *et al.* (2004).

CONCLUSIONES

Panorama actual y manejo de los residuos mineros del DIMITO

Con base en la cartografía, se observa que los jales del DIMITO presentan volúmenes variables relacionados con la paleo-topografía de las cañadas donde fueron depositados, así como por el efecto de una intensa disección de erosión durante más de 68 años. Los jales del DIMITO muestran en general un pH de neutro a ligeramente alcalino, una granulometría prevalentemente limosa (<45–90 µm), una relativa baja conductividad (<80 µS/cm). Su composición mineralógica muestra una predominancia de cuarzo, bajos contenidos de sulfuros y bajas concentraciones de EPT. Este ambiente ó sistema geoquímico, asociado con importantes contenidos de carbonatos (8–20 % vol), indicarían un sistema natural donde ocurren procesos de intemperismo con un bajo, a muy bajo riesgo potencial de generación de DAM. Por otro lado, a pesar del proceso de intensa erosión activa, en general los jales muestran una importante cubierta de regeneración vegetacional, con jales pedogenizados y de suelos húmedos. Esta cubierta húmeda prevendría de manera natural una serie de procesos relacionados con la infiltración, erosión y el transporte de oxígeno a través de los poros del jal (Bradshaw, 1997; Lottermoser, 2010).

Sin embargo, el presente estudio sólo representa una primera aproximación geoquímica de los jales, por lo que resulta fundamental estudiar los procesos de liberación y movilidad de los metales a través de los poros de agua en un sistema alcalino como los jales DIMITO. Así mismo, se requiere reunir otros datos del comportamiento geoquímico de los flujos de agua generados por los jales, así como de la incorporación del drenaje de aguas de mina de vetas y socavones abandonados al sistema hidrológico del DIMITO (Nieto-Monroy, 2007).

Paradojicamente, aunque la naturaleza de la región del DIMITO muestra una tendencia que favorece la regeneración vegetacional y de un sistema biótico devastado hace 68 años, no se conoce alguna intervención institucional o ciudadana que haya considerado la problemática ambiental de post-minería. Los residuos y obras mineras hoy forman parte de un paisaje en abandono. Algunas de las áreas de los jales, incluso de los socavones con drenaje de mina han sido poco a poco ocupados por nuevas construcciones de casas, así como por cultivos domésticos (*e.g.* maiz, frijol). Aunque otros estudios de geoquímica serían siempre necesarios para ponderar el impacto ambiental, pero la información y comunicación con y desde los habitantes del DIMITO resulta hoy la prioridad para un correcto plan de manejo y regulación del territorio de post-minería en el DIMITO.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo es una contribución del fideicomiso CONACyT-Gobierno del Estado de Michoacán, FOMIX-2005-C01-014. Se agradece el apoyo y completa disponibilidad de la valiente dirigencia del Museo Tecnológico Mina Dos Estrellas. En particular al Mtro. Gustavo Bernal y a Carmelita subdirectora del Museo que en esos años nos brindaron su apoyo. Se agradece al Ing. Teodoro Hernández Treviño del LUGIS-UNAM, por su apoyo en el proceso de preparación de las muestras y separación de minerales. Se agradecen las sugerencias y correcciones de dos revisores anónimos, las cuales han mejorado notablemente el manuscrito, así como a Luigi Solari por el trabajo editorial.

REFERENCIAS

Aguilar Contreras, A., 1971, Reporte sobre las principales acumulaciones de jales que hay en los alrededores de a población del El Oro, Mex: Servicio Geológico Mexicano – Consejo de Recursos Minerales, Informe interno, 7 pp.

Albinson, T., Norman, D.I., Cole, D., and Chomiak, B.A, 2001, Controls on formation of low-sulfidation epithermal deposits in Mexico: constraints from fluid inclusion and stable isotope data: Society of Economic Geologists, Special Publication Series, 8, 1-32.

Armienta M.A., Segovia N, 2008, Arsenic and Fluoride in the groundwater of Mexico: Environment Geochemical and Health, 30, 345-353.

Armienta, M.A., Talavera, O., Morton, O., Barrera, 2003, Geochemistry of Metals from Mine Tailings in Taxco, Mexico: Bulletin Environmental Contamination Toxicology, 71, 387-393.

Bernal-Navarro, G., 2012, Notas y apuntes para la historia de la Mina Las Dos Estrellas: México D.F., APE Editorial, , 80 pp.

Blowes, D.W. Jambor J.L., 1994, The environmental geochemistry of sulfide mine wastes: Waterloo, Mineralogical Association of Canada, 225 pp.

Blowes D.W., Bain, J.G., Smyth, D.J., Ptacek, C.J., 2003, Treatment of mine drainage using permeable reactive materials: In: Jambor JL, Blowes DW, Ritchie AIM (eds) Environmental aspects of mine wastes, Vol 31. Mineralogical Association of Canada, Nepean, (Short course handbook), 361–376.

Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Jambor, J.L., Weisener, C.G., Paktunc, D., Gould, W.D., Johnson, D.B., 2014, The geochemistry of acid mine drainage, *en* Turekian, H.D.H.K. (Ed.), Treatise on Geochemistry: Oxford, Elsevier, second ed., 131-190.

Bouzahzah, H., Benzaazoua, M. Bussiere, B., Plante, B., 2014, Prediction of Acid Mine Drainage: Importance of Mineralogy and the Test Protocols for Static and Kinetic Tests: Mine Water Environ, 33(1), 54-65.

Bradshaw, A.D., 1997, Restoration of mine-land using natural processes: Ecological Engineering, 7(8), 255-269.

Burkart, J., 1869, Descripción del distrito de Minas de Tlalpujahua y de su constitución geológica: Boletín de la Sociedad de Geografía y Estadística de la República Mexicana, segunda época, tomo 1, 82-111.

Bustamante-García, J., 2007, Inventario Físico del Municipio de Tlalpujahua: Servicio Geológico Mexicano, Informe interno, 95 pp.

Campa, M.F., Coney P.J., 1983, Tectonostratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, 20, 1040-1051.

Camprubí, A., Ferrari, L., Cosca, M., Cardellach, E., Canals, A., 2003, Ages of epithermal deposits in Mexico: regional significance and links with the evolution of tertiary volcanism: Economic Geology, 98(5), 1029-1037.

Candente Gold Corp, 2014, Candente gold announces El Oro tailings inferred resource, http://www.marketwired.com/press-release/candente-gold-announces-el-oro-tailings-inferred-resource-contains-119900-oz-gold-3m-tsx-cdg-1928443.htm (Última consulta 23/07/2017).

Centeno-García, E., Corona-Chávez, P., Talavera-Mendoza, O., Iriondo, A. 2003, Geology and tectonic evolution of the western guerrero terrane: a transect from Puerto Vallarta to Zihuatanejo, *en* Geologic Transects Across Cordilleran Mexico, Guidebook for the fieldtrips of the 99th Geological Society of America Cordilleran Section Meeting: Publicacion especial del Instituto de Geología y Centro de Geociencias UNAM, 201-228.

Corona-Chávez P., Uribe-Salas, J.A., 2009, Atlas cartográfico del distrito minero El Oro y Tlalpujahua: Morelia, Mich., Morevallado Editores, 105 pp.

Corona-Chávez, P., Uribe-Salas, J.A., Razo-Pérez, N., Martínez-Medina, M. Maldonado-Villanueva, R., Ramos-Arroyo Y., Robles-Camacho, J., 2010, The impact of mining in the regional ecosystem: the mining district of El Oro and Tlalpujahua, Mexico: De Re Metallica, 15, 21-34.

De la Teja-Segura, M.A., Moctezuma-Salgado, M.D., Vergara, A., 1999, Carta geológico-minera El Oro de Hidalgo E14-A16, escala 1:50,000: Servicio Geológico Mexicano Informe Técnico Clave: 151999TESM0001 (http://www.sgm.gob.mx/), 40p. 1 mapa, consultado el 15 de noviembre de 2017.

Elvir-Aceituno, R., 1955, Informe geológico de la región auroargentífera de El Oro, México y Tlalpujahua, Michocán: México D.F., 56 pp.

Flores, T., 1920, Estudio Geológico Minero de los Distritos de El Oro y Tlalpujahua: Cd. de México, Secretaria de Gobernación, 85 pp y anexos.

Fries, C., Jr., Ross C., Obregón, A., 1965, Mezcla de vidrios en los derrames cineríticos las Américas de la Región de El Oro-Tlalpujahua, Estados de México y Michoacán, Parte Centro meridional de México: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Boletín del Instituto de Geología, 70, 1-84.

García, E., 1998, Climas (clasificación de Koppen, modificado por García): México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Escala 1:1'000,000, 1 mapa.

Hageman, P.L., Seal, R., Diehl, S.F., Piatak, N.M., Lowers, H.A., 2015, Evaluation of selected static methods used to estimate element mobility, acid-generating and acid-neutralizing potentials associated with geologically diverse mining wastes: Applied Geochemistry, 57, 125-139.

Hernández-Bernal, M.S., Corona-Chávez, P., Solís-Pichardo, G., Schaaf, P., Solé-Viñas, J., Molina, J.F., 2016, Miocene andesitic lavas of Sierra de Angangueo: a petrological, geochemical, and geochronological approach to arc magmatism in Central Mexico: International Geology Review, 58(5), 603-625.

Jambor J.L. 1994, Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products, *en* Jambor J.L., Blowes D.W. (eds.) Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes: Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook , 22, 59-102.

Jambor, J.L. 2003, Mine-waste mineralogy and mineralogical perspectives of acid-base accounting, *en* Jambor J.L., Blowes D.W., Ritchie A.I.M. (eds.) Environmental aspects of mine wastes: Mineralogical Association of Canada, 31, 117-145.

Jambor, J.L., Blowes, D.W., 1998, Theory and applications of mineralogy in environmental studies of sulfide-baring mine waste: *en* Cabri, L.J., Vaughan, D.J. (eds.), Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy: Ottawa, Canadá, Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 27, 367-401.

Jambor, J.L., Dutrizac, J.E., Groat, L.A. Raudsepp, M., 2004, Static tests of neutralization potentials of silicate and aluminosilicate minerals: Environmental Geology, 43, 1-17.

Jamieson, H.E. 2011, Geochemistry and mineralogy of solid mine waste: essential knowledge for predicting environmental impact: Elements, 7, 381-386.

Jamieson, H.E., Walker S.R., Parsons, M.B. 2015, Mineralogical characterization of mine waste: Applied Geochemistry, 57, 85-105.

Lindsay, M.B.J., Moncur, M.C., Bain J.G., Jambor, J.L., Ptacek, C.J. Blowes, D.W., 2015, Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings: Applied Geochemistry 57, 157-177.

Lottermoser, B.G., 2010, Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental impacts: Berlin Heilderberg, Springer-Verlang, 278 pp.

Lottermoser, B.G., 2017, Predicting Waste Properties Using the Geochemistry-Mineralogy-Texture-Geometallurgy Approach *en* Enviromental indicators in metl mining: Berlin Heilderberger, Springer, 403 pp.

Lozano-Santa Cruz R., Verma S.P., Girón P., Velasco F., Morán D., Viera F. Chávez, G., 1995, Calibración preliminar de fluorescencia de rayos X para análisis cuantitativo de elementos mayores en rocas ígneas: Actas INAGEQ, 1, 203-208.

Maldonado-Villanueva, R., 2008, Caracterización mineralógica de fases minerales metálicas en muestras de jales del distrito minero El Oro-Tlalpujahua, México: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura, 89 pp.

Macías-Vázquez, J.L., Corona-Chávez, P., Sanchéz-Núñez, J.M., Martínez-Medina, M., García-Tenorio, F., Cisneros-Máximo, G., Garduño-Monroy, V.H. 2015, The may 27, 1937 catastrophic flow failure of gold tailings at Tlalpujahua, Michoacán, México: Natural Hazards and Earth System Sciences, 15, 1069-1085.

Markert, B., 1987, The pattern of distribution of lanthanide elements in soils and plants: Phytochemistry, 26(12), 3167-3170.

Martín-Romero, F., Armienta, M.A., Gutiérrez, M.E., Villaseñor, G., 2008, Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el Impacto ambiental de jales mineros: Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 24(2), 43-54.

Martínez-Medina, M., 2009, Evaluación de la importancia económica (recuperación secundaria) y del efecto del impacto ambiental en la calidad del agua por residuos mineros (jales) en el distrito minero de Tlalpujahua Michoacán: Morelia, Mich., Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Tesis de Maestría, 115 pp.

Moncur, M.C., Ptacek, C.J., Blowes, D.W., Jambor, J.L., 2005, Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment: Applied Geochemistry, 20, 639-659.

Morales, J., Hernández-Bernal, M.S., Corona-Chávez, P., Gogichaishvili, A., Bautista. F. 2016, Further evidence for magnetic susceptibility as a proxy for the evaluation of heavy metals in mining wastes: case study of Tlalpujahua and El Oro Mining Districts: Environment Earth Sciences, 75:309, doi.org/10.1007/s12665-015-5187-8.

Nieto-Monroy, A.P., 2007, Variabilidad espacial y temporal de la hidrogeoquímica de arroyos del distrito minero El Oro-Tlalpujahua, Guanajuato: Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Tesis de Licenciatura, 64 pp.

Paktunc, A.D., 1998, *Modan*: An interactive computer program for estimating mineral quantities based on bulk composition: Computer and Geosciences, 24, 425-431.

Paktunc, A.D., 1999, Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage: Environmental Geology, 39, 103-112.

Paktunc, A.D, 2001, MODAN a computer program for estimating mineral quantities based on bulk composition: windows version: Computers and Geosciences, 27, 883-886.

Paktunc, A.D., 2003, *mNP*: A computer program to determine acid generating and neutralization potentials of mine wastes based on mineralogical composition. CANMET Division Report MMSL 03-030 (TR). https://www.researchgate.net/profile/Dogan_Paktunc/contributions, consultado el 9 de noviembre de 2017.

Paktunc, D., Foster, A., Heald, S., Laflamme, G., 2004, Speciation and characterization of arsenic in gold ores and cyanidation tailings using X-ray absorption spectroscopy: Geochimica et Cosmochimica Acta, 68, 969-983.

Pantoja-Alor, J., 1994, Formación Las Américas, Tlalpujahua, Michoacán, México – Una reinterpretación de los datos petrográficos, petroquímicos, tectónicos y de los mecanismos de erupción: Revista Méxicana de Ciencias Geológicas, 11(2), 168-181.

Parbhakar-Fox, A., 2017, Predicting Waste Properties Using the Geochemistry-Mineralogy-Texture-Geometallurgy Approach, *en* Enviromental indicators in metl mining: Berlin Heilderberger, Springer, 55-72.

Plumlee, G.S., 1999, The environmental geology of mineral deposits, *en* Plumlee, G.S., Logsdon, M.J. (eds.), The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits; Part A: Processes, Techniques, and Health Issues: Colorado, Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 6A, 71-116.

Price, W.A., 2009, Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials, CANMET - Mining and Mineral Sciences Laboratories 579 pp.

Ramos-Arroyo, Y.R., Siebe-Grabach, C.D., 2006, Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 23(1), 54-74.

Ramos-Arroyo, Y.R., Prol-Ledesma, R.M., Siebe-Grabach, C., 2004, Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 21(2), 268-284.

Sanchéz-Núñez, J.M, Macías, J.L., Corona-Chávez, P., Martínez-Medina, M., Garduño-Monroy, V.H., Capra, L., García-Tenorio, F., Cisneros-Máximo, G., 2015, Rompimiento y desborde de presas de jales: el caso de estudio de Tlalpujahua (27 de mayo de 1937): Ciencia Nicolaita, 65, 95-119.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2011, Norma Oficial Mexicana NOM-157-2009, Que establece los elementos y procedimiento para instrumentar planes de manejo de rsiduos mineros: México, Diario Oficial de la Federación, 30 agosto de 2011.

Siebe-Grabach, C.D., Jahn, R., Stahr, K., 1996, Manual para la Descripción y Evaluación Ecológica de Suelos en el Campo: Chapingo, México, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., Publicación Especial, 4, 57 pp.

Silva-Ortiz, I., Salgado-Soto, Z., 1988, Estudio estratigráfico estructural en la región de Tlalpujahua - El Oro, Edos. de Michoacán y México: Instituto Politecnico Nacional, Tesis de Licenciatura, 74 pp.

Smart, R., Skinner, W.M., Levay, G., Gerson, A.R., Thomas, J.E., Sobieraj, H., Schumann, R., Weisener, C.G., Weber, P.A., Miller, S.D., Stewart, W.A., 2002, ARD test handbook: project P387A, prediction and kinetic control of acid mine drainage: Melbourne, AMIRA International Ltd, 42 pp.

Talavera, O., Yta, M., Moreno, R., Dótor A., Flores N. and Duarte, C., 2005, Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact: Geofísica Internacional, 44(1), 49-64.

Uribe-Salas, J.A., 2008, Historia de la Minería en Michoacán: Morelia, Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Sociedad Mexicana de Mineralogía, Museo Tecnológico del Siglo XIX "Las Dos Estrellas", Morevallado Editores, 227 pp.

WHO (World Health Organization), 2015, Global Health Observatory data repository. International Health Regulations (2005) monitoring framework: disponible en <http://apps.who.int/gho/data/node.main.IHR?lang=en>, consultado el 15 de junio de 2017.

Manuscrito recibido: agosto 13, 2017
Manuscrito corregido recibido: octubre 9, 2017
Manuscrito aceptado: octubre 12, 2017